Fachhochschule Düsseldorf

Fachbereich: Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Diplomarbeit

Konstruktion, Aufbau und Programmierung eines Drehkanals zur Bestimmung der von Ventilatoren in Kanäle abgestrahlten Schallleistung

Bearbeiter:

Terence Klitz

Matrikel-Nr.: 350072

Labor für Strömungsmaschinen

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. F. Kameier

Dipl.-Ing. Y. Moutamassik

Dipl.-Ing. D. Reinartz

Düsseldorf, Juni 2003

F H D
Fachhochschule Düsseldorf

FH Düsseldorf, Kameier, Josef-Gockeln-Str. 9, D-40474 Düsseldorf

Thema einer Diplomarbeit

für

Herrn Terence Klitz
Matrikel-Nr. 350072

Prof. Dr.-Ing. Frank Kameier
Labor für Strömungstechnik
Fachbereich 4
Maschinenbau und Verfahrenstechnik
Josef-Gockeln-Str. 9
40474 Düsseldorf

Phone (0211) 4351-448
Fax (0211) 4351-468
E-Mail Frank.Kameier@fh-duesseldorf.de
http://ifs.muv.fh-duesseldorf.de

Düsseldorf, den 22.10.2002

Konstruktion, Aufbau und Programmierung eines Drehkanals zur Bestimmung der von Ventilatoren in Kanäle abgestrahlten Schallleistung

Die von Ventilatoren in angeschlossene Kanalleitungen abgestrahlten Geräusche breiten sich im allgemeinen als nicht ebene Wellen aus. Das Kanalverfahren gemäß DIN EN 25136 "Bestimmung der von Ventilatoren in Kanäle abgestrahlten Schallleistung" schreibt daher in Abhängigkeit der Rohrgeometrie eine Mittelung der Geräuschemission in Umfangsrichtung der Messebene vor. Zu diesem Zweck ist ein Drehkanal als Teil eines vorhandenen Ventilatorenprüfstands im Labor für Strömungsmaschinen neu zu konstruieren. Die erforderliche Messprozedur soll automatisierbar sein, so dass der Drehkanal mit einem Schrittmotor bewegt und per Computer ansteuerbar sein soll. Der Drehkanal muss sich extrem ruhig und gleichmäßig bewegen, damit eine akustische Messung während eines Umlauf möglich ist. Die Datenakquirierung soll über die Soundkarte des PCs erfolgen.

Zur Programmierung des Schrittmotor-Feldbusses und der Geräuschaufzeichnung ist das Softwarepaket LabVIEW anzuwenden. Bei der Programmierung ist auf eine besondere Modularisierung zu achten, damit die erstellte Software möglichst universell einsetzbar, in komplexe Messabläufe eingebunden werden kann und einfach zu aktualisieren ist. Im Rahmen eines Portierungsversuchs auf einen Industrieprüfstand der Firma Pollrich GmbH in Mönchengladbach sollen dabei erste Erfahrungen gesammelt werden.

Die Bearbeitung der Arbeit soll in folgenden Schritten erfolgen:

- Auslegung, Konstruktion und Konstruktionsberechnung des Drehkanals und seines Gestells unter Einbeziehung von FEM,
- Programmierung der Feldbusansteuerung des Schrittmotors als erweiterbares Entwicklungstools,
- Zusammenstellung der Messanforderungen gemäß DIN EN 25136, unter Berücksichtigung der akustischen Datenakquirierung, zu einem Modul im Rahmen der LabVIEW Programmierumgebung,
- Dokumentation und Übergabe des Moduls zur Drehkanalsteuerung als Projektergebnis an einen anderen Diplomanden,
- Erprobung einer Portierung der Software auf einen Industrieprüfstand mit der Dokumentation der Probleme,
- Erstellung einer Dokumentation der Arbeit zur Präsentation im Internet.

Inhalt

1 Einleitung 8

2 Prüfstand 9

2.1 Der Prüfstand 10

2.2 Der alte Drehkanal 11

2.3 Der neue Drehkanal 12

3 Konstruktion des Drehkanalgestells 14

3.1 Aufbau des Gestells 15

3.2 Höhenverstellung des Gestells 16

3.3 Anpassung am Drehkanal 17

4 Drehkanalantrieb 19

4.1 Berechnungsgleichungen 20

4.2 Ermittlung der Wellenbelastung 21

4.3 Ergebnis 21

4.4 Riemenspannung 21

5 Berechnung des Gestells 25

5.1 Die verwendeten Profile 26

5.2 Das Koordinatensystem 26

5.3 Bestimmung der Auflagerkräfte des Drehkanals 28

5.4 Erster Schritt: Manuelle Berechnung 29

5.4.1 Erste Annahme: Gelenkige Verbindungsstellen 32

5.4.2 Zweite Annahme: Feste Einspannungen 34

5.4.3 Ergebnisse der manuellen Berechnung 38

5.5 Zweiter Schritt: Anwendung der FEM 38

5.5.1 Anwendung der FEM auf einen Beispielfall 39

5.5.2 Gestaltung des FEM-Modells 40

5.6 Auswertung der Ergebnisse 44

5.6.1 Verbindungswinkel 46

5.6.2 Querträger 46

5.6.3 Entlastungsstütze 48

5.6.4 Ergebnis 51

6 Positioniersteuerung 52

6.1 Verschaltung der Positioniersteuerung 53

6.2 Ausgangsbedingung der Schaltung 55

6.3 Voreinstellungen der Positioniersteuerung 56

7 Kommunikation mit der Twin Line Positioniersteuerung 58

7.1 Betrieb der Positioniersteuerung mit dem Bedienprogramm Twin Line Control Tool (TL CT) 58

7.2 Kommunikationsprotokoll 59

7.2.1 Datenstruktur 59

7.2.1.1 Sendedaten 60

7.2.1.2 Empfangsdaten 62

7.2.2 „sf“- und „rf“-Bit 64

7.2.3 Datenrahmenübersicht 65

7.2.4 Zusammenstellung der Sendedaten an einem Beispiel 66

8 Anwendung der Mess- und Steuerprogramme und der Analyseprogramme 68

8.1 Die Datenakquirierung 69

8.2 Bedienung des Mess- und Steuerprogramms DK_Messfahrt_Aufnahme_XXXXXX.vi 70

8.2.1 Schritt 1: Programmeingaben 71

8.2.2 Schritt 2: Aufnahme der Kalibriersignale 72

8.2.3 Schritt 3: Initialisierung der Positioniersteuerung 73

8.2.4 Schritt 4: Manuellfahrt und Referenzzierung 73

8.2.5 Schritt 5: Messfahrt 74

8.2.6 Schritt 6: Messfahrtwiederholung 74

8.2.7 Schritt 7: Leerfahrt 75

8.2.8 Schritt 8: Programmwiederholung 75

8.3 Bedienung des Programms DK_Stillstand_Aufnahme_XXXXXX.vi 76

8.3.1 Schritt 3: Steuerung der Aufnahme 76

8.3.2 Schritt 4: Optionale Programmwiederholung 77

8.4 Bedienung des Unterprogramms zur Aufnahme der Kalibriersignale 77

8.5 Bedienung des Unterprogramms zur Durchführung einer Manuellfahrt 79

8.6 Hinweise zur Bedienung des Mess- und Steuerprogramms 80

8.6.1 Messkette und Soundeinstellung 80

8.6.2 Anlageneinrichtung 80

8.6.3 Initialisierung der Positioniersteuerung 80

8.6.4 Bediengeschwindigkeit 80

8.6.5 Nachträgliches Hinzufügen von Messpunkten 80

8.6.6 Fehler bei der Soundverarbeitung 81

8.7 Bedienung der Analyseprogramme 81

8.7.1 Kalibrierung der Messkette 81

8.7.2 Analyse der aufgezeichneten WAV-Dateien 82

8.7.3 Darstellung der Ergebnisse 82

9 Programmierung des Mess- und Steuerungsprogramms 84

9.1 Anforderungen an das Mess- und Steuerungsprogramm 84

9.1.1 Programmierumgebung 85

9.2 Programmstruktur 85
9.3 Werkzeuge für die Kommandobearbeitung 88
9.3.1 Das erste Kommandobyte 88
9.3.2 Zusammenstellen der Kommandozeichenkette 90
9.3.3 Auswertung von Empfangsdaten 92
9.3.4 Kommandos senden und Antworten lesen 94
9.4 Betrachtung wesentlicher Programmpunkte 94
9.4.1 Das Frontpanel 95
9.4.2 TLC-Initialisierung 95
9.4.3 Angaben zum Drehkanal 97
9.4.4 Drehkanalpositionierung 98
9.4.4.1 Referenzzierung 98
9.4.4.2 Messfahrt 99
9.4.4.3 Leerfahrt 100
9.4.5 Manuellfahrt 100
9.4.6 Soundkartenkonfiguration 104
9.4.7 Dateispeicherung 105
9.4.8 Aufnahme der Kalibriersignale 105

10 Berechnung der Terzspektren 109
10.1 Berechnung der Terzmittenfrequenzen und der Bandeckfrequenzen 109
10.2 Berechnung der Terzspektren aus diskreten Werten 111

11 Analysatorenvergleich 113

12 Mikrofonkalibrierung 118
12.1 Berechnung des Kalibrierfaktors 118
12.2 Verbesserte Berechnung des Kalibrierfaktors 120

13 Vergleich zwischen HP-Analysator und Soundkarte 122
13.1 Line-In-Aussteuerung 123
13.1.1 Clipping 125
13.2 Vergleich aufgezeichneter Messpunkte 127
13.3 Ergebnis 129

14 Akustische Messungen am Drehkanal 130
14.1 Messaufbau 130
14.2 Durchführung der Messungen 132
14.2.1 Messreihenübersicht 133

15 Auswertung 135
15.1 Werkzeuge 135
15.2 Dämpfung durch die Holzplatten 136
15.3 Einfluss der Einbauposition des Mikrofons und der Drehrichtung des Drehkanals 139
15.4 Betriebsgeräusche des Drehkanals 142
15.4.1 Betrachtung des Frequenzbereiches 144
15.4.2 Untersuchung im Zeitbereich 154

15.5 Vergleich der Spektren des Drehkanals mit denen eines Ventilators 156
15.6 Auswerteergebnisse 161

16 Anmerkungen und Hinweise 163
16.1 Line-In-Aussteuerung 163
16.2 Peaks im Autopowerspektrum 163
16.3 Signalanzeige während der Messfahrt 163
16.4 Geräusche des Gestells 164
16.5 Ausgangsposition des Drehkanals 164
16.6 Voreinstellungen der Positioniersteuerung 164
16.7 Aufnahmen mit dem Programm DK_Stillstand_Aufnahme_XXXXXX.vi 165
16.8 Spannungsversorgung der Positioniersteuerung 165
16.9 Schrittmotordrehzahlen 165

17 Zusammenfassung 166

18 Literaturverzeichnis 168

19 Symbolverzeichnis 170

20 Anhang 175
20.1 Auflistung der verwendeten Geräte 175
20.2 Befestigung des Mikrofons 176
20.3 Antriebskomponenten 177
20.3.1 Riemendaten 177
20.3.2 Schrittmotor 177
20.3.3 Getriebe 178
20.3.4 Zahnscheiben 178
20.3.5 Spannrollen 178
20.4 Koppeltafel 179
20.5 Formulierung der Verschiebungen δ_i 179
20.6 Knickzahlentabelle 180
20.7 Verbindungslemente 181
20.8 Werkstoffdaten der item-Profile 182
20.9 Kabelbelegung für den Schnittstellenumsetzer MP923 182
20.10 Kalibriersignal 183
20.11 Flussdiagramme 184
20.12 Programm-Sequenzstruktur 187
20.13 Aufstellung der verwendeten Parameter 188
20.14 Entwickelte Sub-VIs 189
20.14.1 Achsposition_abfragen_XXXXXX_TGK.vi 191
20.14.2 Befehlsstring_an_TLC_senden_XXXXXX_TGK.vi 191

20.14.3 Befehlsstring_generieren_XXXXXX_TGK.vi 192
20.14.4 Binear_nach_Dezimal_XXXXXX_TGK.vi 192
20.14.5 Binearzahl_generieren_n_bit_XXXXXX_TGK.vi 193
20.14.6 Dezimal_nach_Binear_XXXXXX_TGK.vi 193
20.14.7 Drehkanal_Manuellfahrt_XXXXXX_TGK.vi 193
20.14.8 Hexadezimal_nach_Dezimal_oder_Binear_XXXXXX_TGK.vi 194
20.14.9 Kalibriersignal_aufnehmen_2_Mikrofone_XXXXXX_TGK.vi 194
20.14.10 RMS_Wert_aus_Zeitdaten_XXXXXX_TGK.vi 195
20.14.11 Segmentelement_TLC_auslesen_XXXXXX_TGK.vi 195
20.14.12 Seriell_Schreiben_Lesen_XXXXXX_TGK.vi 196
20.14.13 Serielle_Schnittstelle_initialisieren_XXXXXX_TGK.vi 196
20.15 MATLAB-Quelltexte 197
20.15.1 Kalibrierfaktor_Kanal_bereich.m 197
20.15.2 Wav_Analyse_Programm_auto.m 203
20.15.3 Mat_multiread_Mittelung.m 215
20.15.4 Mat_lesen_darstellen 219
20.16 ANSYS-Quelltext 224
20.16.1 Statische Berechnung des Drehkanalgestells 224
20.17 AutoCAD-Zeichnungen 231

1 Einleitung

An Industrieventilatoren werden bezüglich ihrer aerodynamischen und akustischen Eigenschaften bestimmte Anforderungen gestellt. Um diese Eigenschaften beurteilen zu können, werden die Ventilatoren in genormten Prüfständen aerodynamisch und akustisch vermessen. Im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen dem Labor für Strömungsmaschinen an der Fachhochschule Düsseldorf und der Firma Pollrich Ventilatoren GmbH in Mönchengladbach sollten baugleiche Normprüfstände für Radialventilatoren an beiden Standorten hinsichtlich der Akquirierung aerodynamischer und akustischer Daten automatisiert werden.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Automatisierung des Prüfstandes im Labor für Strömungsmaschinen bezüglich der Akquirierung der akustischen Signale. Das dafür vorgesehene Kanalverfahren nach DIN EN 25136 „Bestimmung der von Ventilatoren in Kanäle abgestrahlten Schallleistung“ schreibt vor, dass der gemessene Schalldruckpegel über den Umfang einer Messebene zu mitteln ist. Mit Hilfe eines sogenannten Drehkanals, als Teil des vorhandenen Ventilatorenprüfstandes, ist es möglich, das Messmikrofon innerhalb der Kanalströmung entlang eines Umfangs in der Messebene zu bewegen.

Ausgangspunkt war ein neuer Drehkanal und eine programmierbare Antriebseinheit, bestehend aus einer Positioniersteuerung und einem Schrittmotor.

Das Ziel der Arbeit war ein Drehkanal samt PC-Programm, das die Drehkanalsteuerung und die Geräuschaufzeichnungen durchführt. Die Geräusche sollten dabei über die PC-Soundkarte aufgenommen und als Rohdaten für Nachbereitungen gespeichert werden können.

Die Umsetzung des Automatisierungsprozesses beinhaltete im wesentlichen drei Teilaufgaben. Zunächst wurde ein Gestell zur Aufnahme des neuen Drehkanals und seines Antriebs konstruiert. Dieser Konstruktionsprozess wurde u.a. durch Festigkeitsberechnungen mit Hilfe der FEM unterstützt. In der anschließenden Programmierphase erfolgte unter LabVIEW die Entwicklung eines Messprogramms zur Steuerung des Drehkanals und simultaner Aufzeichnung akustischer Signale. In der abschließenden Phase wurden die Betriebsgeräusche des Drehkanals, unter Anwendung in MATLAB erstellter Analyseroutinen, analysiert.

Die entwickelten Programme fanden bereits im Rahmen einer parallel laufenden Diplomarbeit [29] am Prüfstand der Firma Pollrich Ventilatoren GmbH Anwendung. Die dabei gewonnenen Kenntnisse flossen in die Programmentwicklung ein.

2 Prüfstand

Ein Kriterium, um die akustischen Eigenschaften verschiedener Ventilatoren miteinander vergleichen zu können, ist deren Schallleistung, die in die angeschlossenen Kanalleitungen abgestrahlt wird. Die abgestrahlte Schallleistung wird u.a. von dem Kanalsystem und der Beschaffenheit der Kanäle beeinflusst. Um hierbei vergleichbare Ergebnisse aus den akustischen Messungen zu erhalten, legt die DIN EN 25136 „Bestimmung der von Ventilatoren in Kanäle abgestrahlten Schallleistung“ [11] ein Verfahren fest, das sogenannte Kanalverfahren. Darin werden die Anforderungen an den Prüfaufbau und die Messgeräte formuliert. Der Prüfstand besteht danach aus dem zu untersuchenden Ventilator einem Zwischenkanal, einem Messkanal, dem sich ein reflexionsarmer Abschluss anschließt, sowie den notwendigen Messeinrichtungen für die akustischen und aerodynamischen Messungen. Im Messkanal werden die akustischen Messungen durchgeführt. Dafür muss dieser in der Lage sein, das installierte Mikrofon an unterschiedlichen Umfangspositionen zu platzieren.
Der Ventilatorenprüfstand im Labor für Strömungsmaschinen entspricht diesen Anforderungen. In der Vergangenheit wurden an ihm Ventilatoren nach dem erwähnten Regelwerk vermessen. Dabei war es möglich die Mikrofonposition entweder schrittweise oder kontinuierlich über dem Umfang zu variieren.

2.1 Der Prüfstand

Der Prüfstand des Labors für Strömungsmaschinen besteht aus dem Prüfobjekt, einem Zwischenkanal, dem Messkanal mit reflexionsarmem Abschluss und den Einrichtungen für aeroakustische Messungen (vgl. (Abbildung 2.1)). Außerdem ist ein Durchgangsschalldämpfer (10) und ein Gleichrichter (5) enthalten, der bei Bedarf gegen eine einfache Rohrleitung ausgetauscht werden kann.

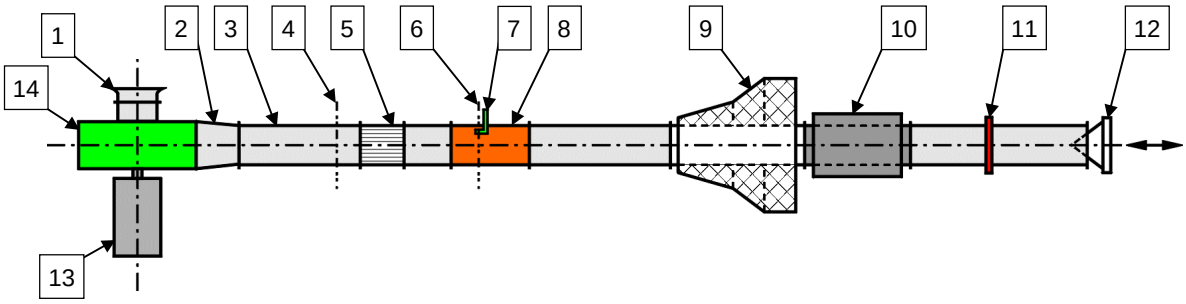


Abbildung 2.1: Skizze des Ventilatorenprüfstandes im Labor für Strömungsmaschinen: 1: Einlaufdüse, 2: Übergangsstück, 3: Zwischenkanal, 4: Ringkanal, 5: Gleichrichter (austauschbar), 6: Messebene des Mikrofons, 7: Messmikrofon mit Schlitzrohrsonde, 8: Drehkanal, 9: Reflexionsarmer Abschluss, 10: Durchgangsschalldämpfer, 11: Ringkammerblende, 12: Drossel (motorisch verstellbar), 13: Elektromotor (Pendelmotor), 14: Ventilator.

Für akustische Messungen an Ventilatoren, die im Einsatz beidseitig am Kanalsystem angeschlossen sind, ist zusätzlich auch die zweite Anschlussseite mit einem Zwischenkanal und reflexionsarmem Abschluss zu versehen. Der Zwischenkanal (3) hat die Aufgabe, bis zur akustischen Messebene (6) die gewünschten Strömungsverhältnisse zu gewährleisten. Die Messebene ist die radiale Ebene im Messkanal, in der sich die Mikrofonmembran befindet. Im vorliegenden Prüfstand des Labors für Strömungsmaschinen ist der Messkanal als Drehkanal ausgebildet. Der Drehkanal besteht prinzipiell aus einem Rohrstück, das gegenüber den angeschlossenen Kanalelementen um seine Längsachse drehbar gelagert ist. Diese drehbare Lagerung wird durch zwei gegeneinandergedrückte Drehflanschscheiben realisiert. Das Rohrstück selbst besitzt eine Zugangsöffnung, um das Messmikrofon mit Schlitzrohrsonde (7) im Inneren platzieren zu können.

2.2 Der alte Drehkanal

Der ursprüngliche Drehkanal des betrachteten Prüfstands musste von Hand bedient werden. Abbildung 2.2 macht das Schema des alten Drehflansches deutlich. Erst, wenn die Verschraubung (3) der beiden Ringscheiben (1) und (2) gelockert war, konnte der Drehkanal (6) gedreht werden.

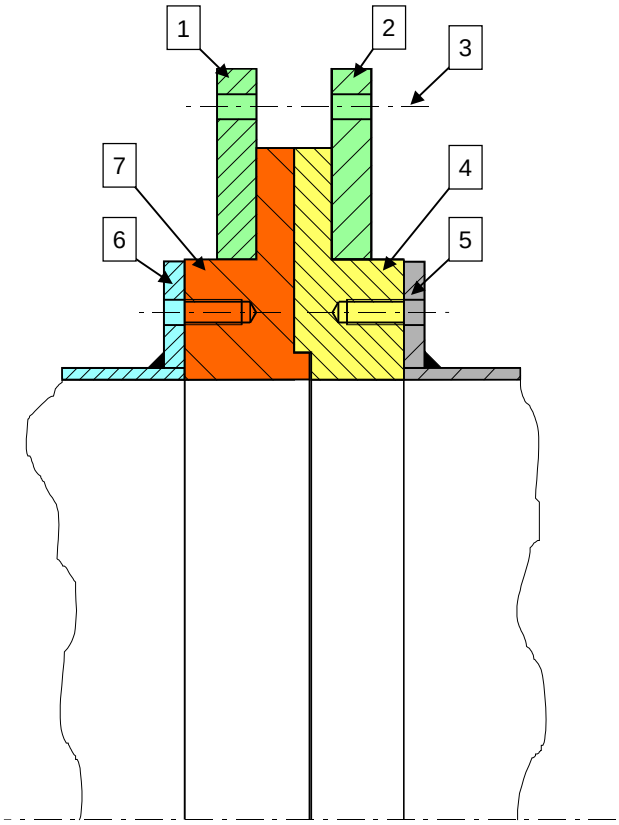


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des alten Drehflansches:
1, 2: Ringscheiben, um den Drehflansch zusammen zu halten, 3: Verschraubung der Ringscheiben, 4,7: Die beiden Drehflanschscheiben, 5: Angeflanschte Kanalleitung (feststehend), 6: Rohr des Drehkanals.

Beim Wechseln der festen Mikrofonpositionen mussten somit die Schraubverbindungen (3) gelockert und nach dem Verdrehen wieder angezogen werden. Das kontinuierliche Drehen des Drehkanals konnte nur bei leicht gelockerten Schrauben (3) geschehen. Zwischen die Drehflanschscheiben (4) und (7) eingebrachtes Fett schloss den Spalt gasdicht ab. Die Drehung des Drehkanals wurde mit der gleichförmigen Bewegung eines Hallenkrans gekoppelt, ähnlich wie es Abbildung 2.3 andeutet. Damit benötigte der Drehkanal etwa 100 s für eine Umdrehung, wenn der Kran im Feinhub betrieben wurde.

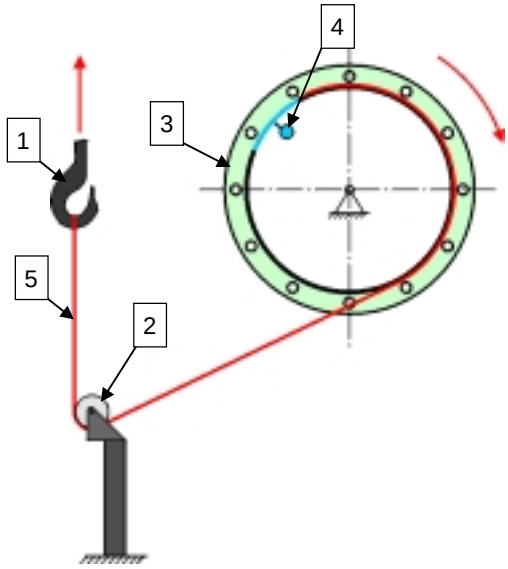


Abbildung 2.3: Schema der Bewegungskopplung zwischen Kran und Drehkanal: 1: Hallenkranhaken, 2: Umlenkrolle, 3: Drehkanal mit Mikrofon (4), 5: Seil.

Bei den in der Vergangenheit mit dem alten Drehkanal durchgeführten akustischen Messungen wurden nur Frequenzspektren erstellt und abgelegt. Eine Speicherung von Zeitdaten erfolgte nicht.

2.3 Der neue Drehkanal

Der grundlegende Aufbau des alten Drehkanals wurde beibehalten. Beiden Drehkanälen ist das Rohr gemein, in dem das Mikrofon untergebracht wird. Der Hauptunterschied zwischen beiden findet sich in der Lagerung und im Antrieb.

Die Drehflansche des neuen Drehkanals sind dreiteilig ausgeführt (Abbildung 2.4). Eine drehbare Kreisringscheibe (1) wird mit ihrem inneren Umfang auf einer zweiten, jedoch feststehenden Scheibe (5) radial gelagert. Axial wird sie durch die zweite und einer dritten, ebenfalls feststehenden Scheibe (2) gehalten. Die beiden unbeweglichen Scheiben sind miteinander verschraubt (4) und pressen auf diese Weise ihre Gleitflächen auf die der beweglichen Scheibe. Zwischen diesen axialen Anlaufflächen befindet sich jeweils ein ölgetränkter Filzring (10), der die Drehbarkeit und Dichtigkeit sicherstellt. Das Rohr des Drehkanals (8) wird an der drehbaren Scheibe angeschraubt (9).

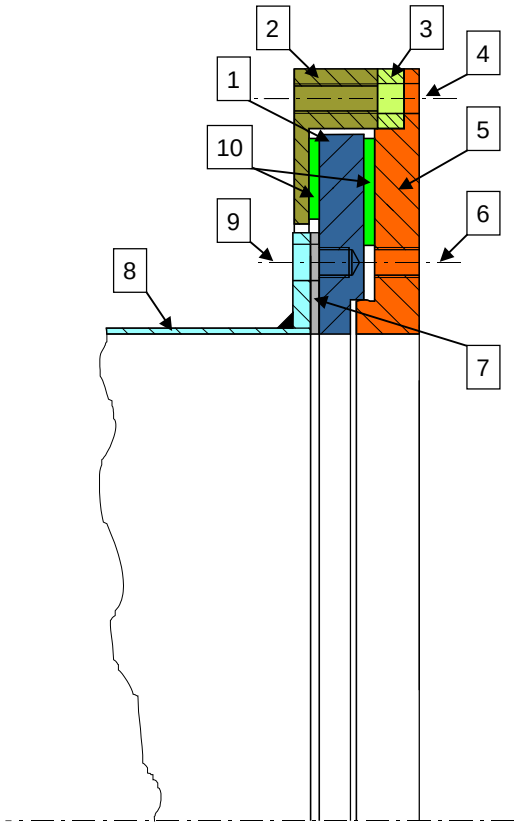


Abbildung 2.4: Schematisierter Querschnitt des neuen Drehflansches:
1: Drehbare Kreisringscheibe, 2: Zweite Scheibe zur axialen Sicherung, 3: Distanzstück, 4: Verschraubung der beiden äußeren Ringscheiben, 5: Dritte Ringscheibe mit einem Absatz für die radiale Lagerung, 6: Verschraubung der angeschlossenen Kanalleitung (unbeweglich), 7: Dichtungsscheibe, 8: Rohr des Drehkanals, 9: Flanschverschraubung des Drehkanals, 10: Eingelegte Filzscheiben.

Die Drehung des Rohrstückes übernimmt ein Schrittmotor, der mit dem Kanal über einen Riemenantrieb verbunden ist. Dieser Motor wird über eine programmierbare Leistungselektronik angesteuert, die mit einem PC angesprochen wird. Damit ist es möglich, die Mikrofonrotation und die akustische Messdatenakquirierung über ein Computerprogramm zu koppeln. Die gewonnenen Rohdaten können schließlich in der Nachbereitung den jeweils gewünschten Analyseberechnungen zugeführt werden.
Mit dem neuen Drehkanal und seinen Komponenten wird eine automatisierte Messdatenerfassung möglich gemacht.

3 Konstruktion des Drehkanalgestells

Ausgangspunkt für die konstruktive Bearbeitung war ein Drehkanal mit Drehflanschen wie ihn die Abbildung 3.1 darstellt. Aufgrund von Toleranzen bei der Fertigung der Drehflansche wurde das zum Drehen des Drehkanals benötigte Drehmoment deutlich erhöht, so dass schon im Vorfeld dieser Arbeit ein Zahnriemenantrieb vorgesehen wurde. Das über diesen Antrieb aufgebrachte Drehmoment sollte über die Stahlwinkel (7) abgestützt werden.

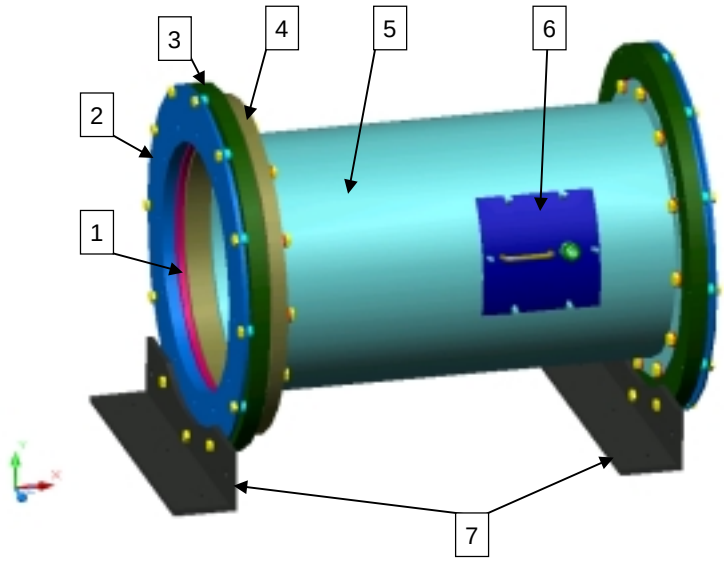


Abbildung 3.1: Ausgangssituation des Drehkanals für die konstruktive Gestaltung des Gestells: 1, 2, 3: Drehflanschelemente, 4: Zahnscheibe, 5: Rohr des Drehkanals, 6: Zugangsklappe, 7: Stahlwinkel.

Für diesen Drehkanal galt es ein Gestell zu konstruieren, welches dessen Lagerung und Antrieb aufnimmt, so dass diese Einheit auch getrennt vom Prüfstand stehen kann. Außerdem musste über dieses Gestell eine Höhenverstellung des Drehkanals möglich sein. Für die Gestaltung der Gestellkonstruktion wurden Aluminiumprofile aus dem Systembaukasten der Firma item [21] verwendet.

Der Konstruktionsprozess beinhaltete im wesentlichen drei Schritte:

- Im ersten Schritt wurde ein Testgestell aus dem vorhandenen Material aufgebaut, um das Konstruktionsprinzip und den Antrieb zu testen.
- Der nächste Schritt diente, ausgehend von den Erfahrungen mit diesem Testgestell, der Vervollständigung der Konstruktion und der Beschaffung des dazu benötigten Materials.

- Der dritte Schritt beinhaltete eine Nachberechnung ausgewählter Elemente des Gestells hinsichtlich ihrer Belastung. Die Berechungen werden in den Abschnitten 4 und 5 behandelt.

3.1 Aufbau des Gestells

Die umgesetzte Gestellkonstruktion besteht im Grunde aus zwei ineinander verschachtelten Gestellen (Abbildung 3.2). Das innere Gestell (a)) trägt dabei den Drehkanal und den Antrieb, während es selbst vom äußeren Gestell (b)) gehalten wird und in diesem vertikal verstellbar ist. Zum Ausgleich von Bodenunebenheiten besitzt das äußere Gestell verstellbare Füße (9).

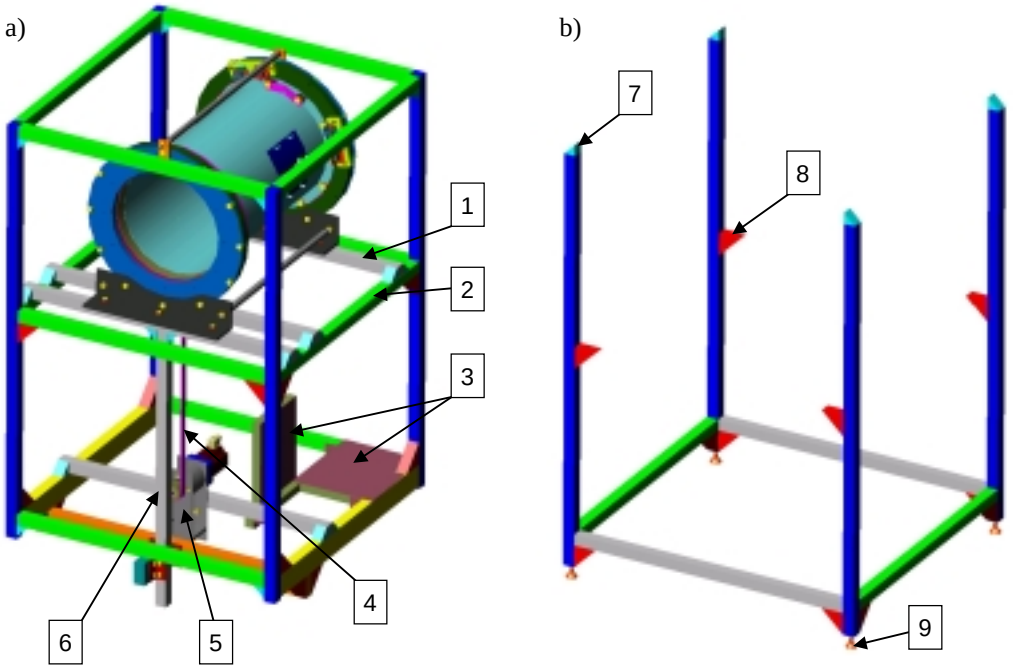


Abbildung 3.2: Darstellung der beiden Gestellteile:
a) Innerer Gestellteil, b) Äußerer Gestellteil,
1: Querträger, 2: Längsträger, 3: Montageflächen für die Motorsteuerung und ein Netzteil, 4: Zahnriemen, 5: Antriebseinheit (Schrittmotor, Getriebe), 6: Entlastungsstütze, 7, 8: kleine und große Winkel, mit denen beide Gestellteile verbunden werden, 9: Stellfüße.

Der Drehkanal wurde oberhalb der Antriebseinheit (5) platziert, um die Bauhöhe des Gestells zu beschränken. Zudem vereinfacht sich dadurch die Montage, weil der Drehkanal dadurch von oben in das Gestell hineingesetzt werden kann, ohne einen Antrieb demontieren zu müssen. Die Belastung durch den Drehkanal wird über Quer- und Längsträger (1, 2) in die senkrechten Stützen geleitet. Der darunter befestigte Antrieb erhielt einen vergleichbaren Trägerrahmen. Eine senkrechte Stütze (6) unterstützt die Verbindungselemente bei der Auf-

nahme der Antriebskräfte. Dieses innere Gestell ruht auf vier Winkeln (8), die mit dem äußeren Gestell verbunden sind. Zusätzlich ist das äußere Gestell über Verbindungswinkel (7) an seinem oberen Ende mit dem inneren Gestellteil verbunden. Bei einer Höhenverstellung wird somit der gesamte Antriebsstrang verschoben, wodurch er nur einmal eingerichtet werden muss.
Die einzelnen Profile wurden über große und kleine Winkelsätze miteinander verbunden. Dadurch kann deren Position auch nachträglich ohne großen Aufwand verändert werden und ihre Querschnitte werden nicht durch Bohrungen geschwächt, was der Festigkeit zugute kommt. Lediglich die obersten Eckverbindungen wurden zusätzlich mit Verbindungssätzen ausgestattet. An diesen Positionen ist eine Querschnittsschwächung nicht problematisch und das Gestell gewinnt an Steifigkeit (vgl. auch Anhang 20.7).

3.2 Höhenverstellung des Gestells

Es sind mindestens zwei Personen und ein Kran zur Sicherung erforderlich, um die Höhe des Gestells zu variieren. Der Drehkanal muss für diesen Vorgang von der übrigen Rohrleitung entkoppelt sein. Über die Konstruktion kann die Mittelachse des Drehkanals auf Höhen zwischen 1400 und 2000 mm eingestellt werden.
Nach Entkoppeln des Drehkanals von den angeschlossenen Rohrleitungen, ist der Zahnriemen vom Ritzel herunterzuziehen. Danach ist der Drehkanal von Hand soweit zu drehen, bis sich die Zugangsöffnung an der obersten Position befindet. In dieser Stellung werden die Trageschlingen nicht durch die Gewindestifte behindert. Mit Hilfe von zwei Trageschlingen ist der Drehkanal über den Kran derart zu sichern, dass das Gestell nach dem Lösen der Schraubverbindungen nicht absacken kann. Vor dem weiteren Arbeitsgang ist sicherzustellen, dass die Verschiebung der beiden Gestellteile nicht durch zusätzlich angebrachte Verbindungselemente behindert wird. Diese sind zu lösen, oder ggf. zu entfernen.
Beim Lockern der Schrauben wird mit den unteren acht Schrauben (2) (Abbildung 3.3) begonnen. Anschließend werden die oberen vier Schrauben (4) gelockert. Dabei ist darauf zu achten, die Schrauben gut zu lockern, jedoch nicht zu entnehmen. Die in den Stirnflächen sitzenden Schrauben (5) dürfen nicht gelockert werden.
Zum Einstellen der Höhe wird empfohlen, den inneren Gestellteil mit dem Kran ein kleines Stück über die Sollhöhe hinaus anzuheben und anschließend von oben die Wunschhöhe anzufahren. Es ist darauf zu achten, dass die Höhenverstellung an allen vier Stützen um denselben Betrag erfolgt. Jede Stütze wird dabei auf das gewünschte Maß eingestellt und durch Anzie-

hen der Schraube (4) fixiert. Danach werden die unteren acht Schrauben wieder fest angezogen.

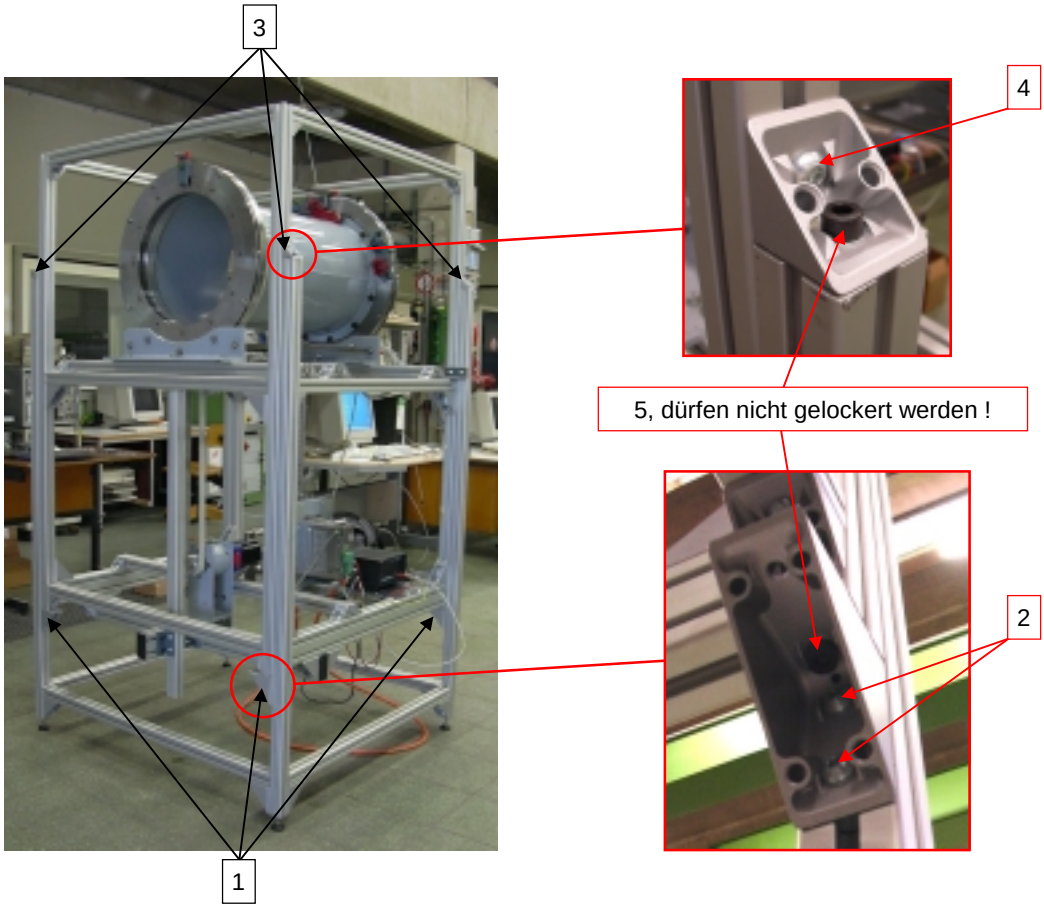


Abbildung 3.3: Für die Höhenverstellung zu lockernde Schraubverbindungen; ACHTUNG: Die Schrauben (5) dürfen nicht gelockert werden.

Das Gestell kann danach langsam wieder abgelassen werden. Zum Schluss sind alle Schraubverbindungen noch einmal zu prüfen, solange der Kran den Drehkanal noch sichert. Über die Stellfüße können kleine Höhenschläge ausgeglichen werden.

3.3 Anpassung am Drehkanal

Für die Funktion des Drehkanals ist es wichtig, dass die drei Scheiben der Drehflansche jeweils parallel zu einander laufen. Ein Verkanten erhöht das Drehmoment und stört den Betrieb. Die Gefahr eines Verkantens besteht beispielsweise beim Einbau des Drehkanals in das Gestell, wenn die Winkel (7) (Abbildung 3.1) beim Verschrauben verschoben werden. Zudem kann auch eine Bewegung der angeschlossenen Kanalleitung, wie sie in Abbildung 3.4 schematisiert ist, zu diesem Problem führen.

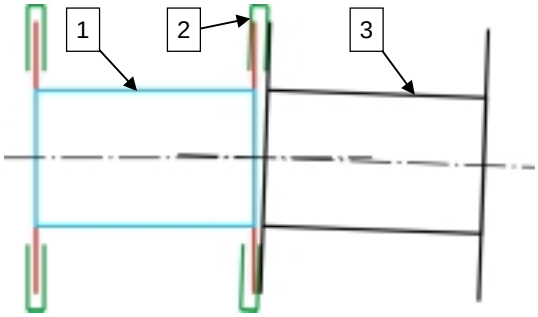


Abbildung 3.4: Verkanten der Drehflanschscheiben (2) durch Bewegen der angeschlossenen Kanalleitung (3), 1): Rohr des Drehkanals.

Als Gegenmaßnahme wurden die beiden Drehflanschebenen des Drehkanals über drei Spannstangen (1) zu einander fest ausgerichtet (Abbildung 3.5).

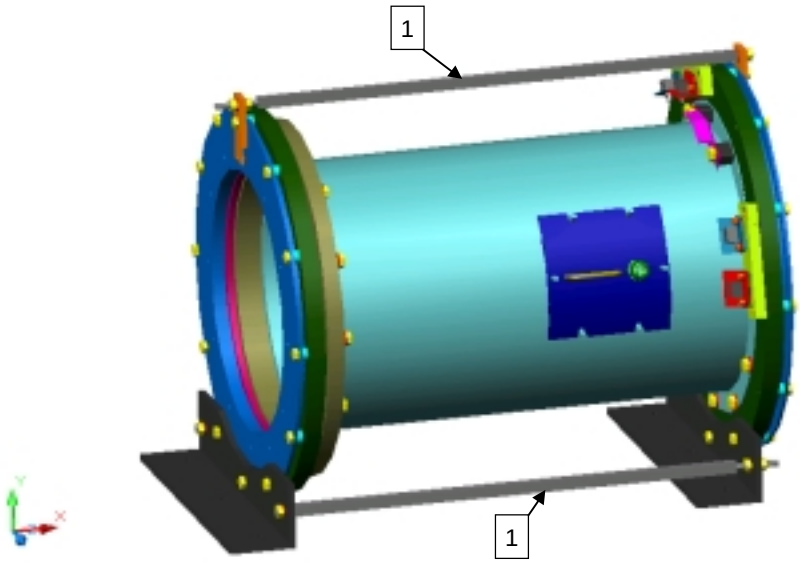


Abbildung 3.5: Maßnahme gegen das Verkanten der Drehflanschscheiben: 1): Spannstangen (CAD-Zeichnungen s. Anhang 20.17).

4 Drehkanalantrieb

Der Zahnriemenantrieb des Drehkanals entspricht einem Zweiwellenantrieb, wie er in (Abbildung 4.1) abgebildet ist. Im Unterschied zum skizzierten, verfügt der verwirklichte Antrieb über zwei Spannrollen, die in der Nähe der großen Zahnscheibe platziert sind. Zum Einsatz kommt dabei ein sogenannter BRECOFLEX-Zahnriemen der Firma Breco, mit einem Hochleistungsprofil AT 10 [25].

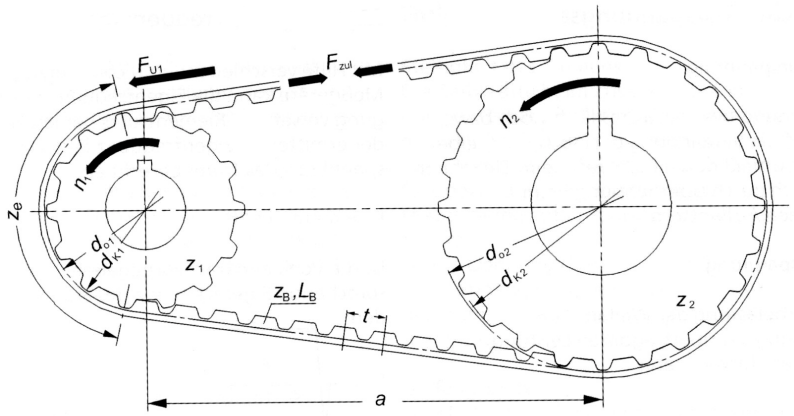


Abbildung 4.1: Darstellung eines Zweiwellenantriebes mit einem Zahnriemen nach [25] zur Erläuterung der relevanten Größen.

Legende zu Abbildung 4.1:
Indizes: 1 kleine Scheibe
2 große Scheibe

d_0 Wirkkreisdurchmesser [mm]
d_k Kopfkreisdurchmesser [mm]
F_U Umfangskraft [N]
F_{zul} zulässige Seilzugkraft [N]
L_B Länge des Zahnriemens [mm]
n Drehzahl [min^{-1}]
t Teilung des Zahnriemens [mm]
z Anzahl der Zähne der Scheibe
z_B Anzahl der Zähne des Riemens
z_e im Eingriff befindliche Zähne

Der Drehkanal wird über einen Schrittmotor angetrieben, dessen Drehmoment zunächst durch ein zweistufiges Planetengetriebe mit einer Übersetzung von 25 : 1 verstärkt wird. Der sich daran anschließende Zahnriementrieb erzeugt eine Übersetzung von 8 : 1, somit besitzt der gesamte Antriebsstrang eine Übersetzung von 200 : 1.
Für die Antriebsberechnung wurde zunächst das maximale Drehmoment des Schrittmotors von 2 Nm zugrunde gelegt. In einem weiteren Schritt wurde das zum Drehen des Drehkanals benötigte Drehmoment geschätzt.

Das primäre Ziel dieser Berechnungen war es, die radiale Wellenbelastung zu bestimmen. Sie war für die Beurteilung der Gestellbelastung notwendig.

Größe	Wert
Teilung t	10 mm
Anzahl der Zähne des Riemens z_B	300
Anzahl der Zähne der kleinen Scheibe z_1	21
Anzahl der Zähne der großen Scheibe z_2	168
Gesamtübersetzung i_{ges}	200
max. Motordrehmoment M_1	2 Nm
Seilzugfestigkeit F_{zul}	3500 N

Tabelle 4.1: Für die Berechnung relevante Angaben zum Antrieb.

4.1 Berechnungsgleichungen

Die notwendigen Gleichungen für die Bestimmung der Wellenbelastung lauten:

$$d_0 = \frac{t \cdot z}{\pi} \qquad (4.1)$$

d_0 Wirkkreisdurchmesser
t Teilung des Zahnriemens
z Zähnezahl der Zahnscheibe

$$F_U = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot M}{d_0} \qquad (4.2)$$

F_U Umfangskraft in N
M Drehmoment an der jeweiligen Scheibe in Nm
d_0 Wirkkreisdurchmesser nach Gleichung (4.1) der jeweiligen Scheibe

Die Vorspannkraft F_V ist nach [25] bei einem Zweiwellenantrieb von der Riemenlänge, bzw. der Anzahl der Riemenzähne, abhängig. Aus [25] ist für den vorliegenden Riemen folgende Empfehlung zu entnehmen:

$$z_B > 150: \quad F_V = \frac{2}{3} \cdot F_U \qquad (4.3)$$

z_B Anzahl der Zähne des Riemens
F_V Vorspannkraft des Riemens

Die Wellenbelastung kann nach [31] wie folgt aus der Umfangskraft abgeleitet werden:

$$F_W = (1{,}5 \ldots 2) \cdot F_U \qquad (4.4)$$

F_W radiale Wellenbelastung

Für die vorliegende Arbeit wurde das Maximum des angegeben Bereiches für die Wellenbelastung angewendet:

$$F_W = 2 \cdot F_U \qquad (4.5)$$

Weil nach [2] die Summe der Vorspannkraft und der Umfangskraft die Seilzugfestigkeit nicht überschreiten darf, ist auch die folgende Bedingung einzuhalten:

$$F_U + F_V \leq F_{zul} \qquad (4.6)$$

4.2 Ermittlung der Wellenbelastung

Die Bestimmung der Wellenbelastung erfolgte unter zwei Gesichtspunkten:
Durch Ansetzen des maximalen Drehmoments wurde der theoretisch ungünstigste Belastungsfall ermittelt. Dieser soll jedoch im Betrieb des Drehkanals nicht auftreten, daher wurde versucht, durch eine Schätzung, ein reales Drehmoment zu finden. Da sich der Drehkanal von Hand mit etwas Mühe bewegen lässt, wurde ein benötigtes Drehmoment von 60 Nm für die Berechnung angesetzt.
Die Ergebnisse beider Belastungsfälle sind in Tabelle 4.2 aufgelistet.

Fall	**[Nm] M_2**	**[mm] d_{01}**	**[mm] d_{02}**	**[N] F_U**	**[N] F_V**	**[N] F_Z**	**[N] F_W**	**[N] $F_{W,r}$**
1	400	66,8	534,8	1496	997	2493	**2992**	**3000**
2	60	66,8	534,8	224	150	374	**449**	**450**

Tabelle 4.2: Ergebnisse zu den beiden Belastungsfällen: $F_Z = F_U + F_V$,
für die Berechnungen des Gestells wurde die ermittelte Wellenkraft F_W aufgerundet ($F_{W,r}$).

4.3 Ergebnis

Der Riemen wird unter der maximalen Belastung nicht überlastet. Die auftretende Zugkraft F_Z im Lasttrum bleibt unterhalb der Seilzugfestigkeit des verwendeten Zahnriemens. Beide Belastungsfälle wurden in der Berechnung des Drehkanalgestells berücksichtigt.

4.4 Riemenspannung

Der Riementrieb des Drehkanals verläuft wie in Abbildung 4.2 dargestellt. Der Achsabstand a_a und die Zustellung der beiden Spannscheiben d_{Sp} sind so eingestellt, dass sich der Riemen

von Hand auf das Antriebsritzel (2) aufschieben lässt, wenn die Vorspannung gelockert ist. Zum Vorspannen des Riemens sind die beiden Spannscheiben R und L über ihre exzentrisch gelagerten Wellen aus der entspannten Lage in Pfeilrichtung nach innen zu drehen. Dabei ist der Maulschlüssel zum Spannen nur einmal anzusetzen. Ist der Riemen gespannt, sind die Befestigungsschrauben anzuziehen. Beim Spannen richtet sich die Vorspannkraft danach, wie weit die Spannscheiben in Richtung des Riemens gedreht werden. Die maximal einstellbare Vorspannung ist erreicht, wenn das Ende des Drehbereiches des Maulschlüssels erreicht ist. Für den Betrieb des Drehkanals ist jedoch diese maximale Vorspannung nicht notwendig und sollte zur Entlastung des Gestells auch nicht aufgebracht werden. Eine ausreichende Vorspannung liegt vor, wenn die Linie (C) auf dem Maulschlüssel mit den Strichen (A) und (B) auf den Spannscheibenhalterungen fluchtet.

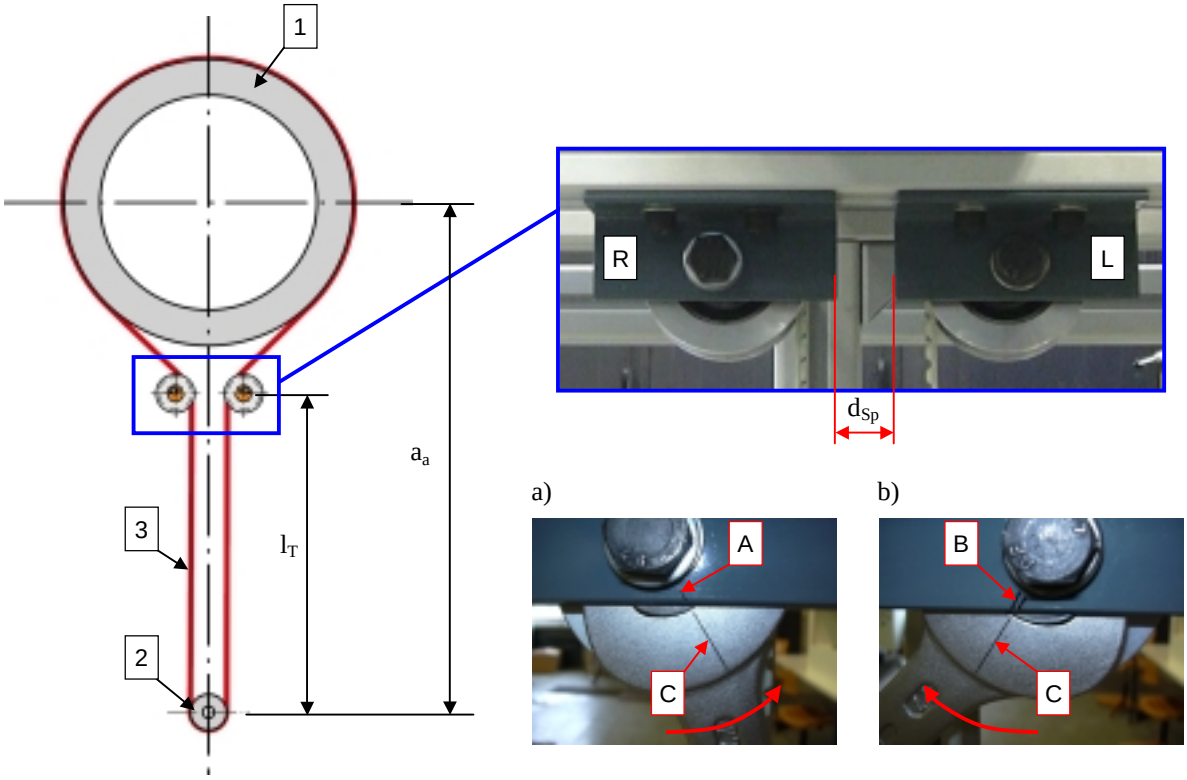


Abbildung 4.2: Skizze des Zahnriemenverlaufs des Drehkanalantriebs (Legende s. Tabelle 4.3): Das Bild oben rechts zeigt die beiden Spannrollen R und L, die Bilder a) und b) zeigen die Maulschlüsselstellung für die minimale Vorspannung.

Legende zu Abbildung 4.2			
1	Zahnscheibe	d_{Sp}	Halterungsabstand = 24 mm
2	Ritzel	R	rechte Spannscheibe mit Halterung
3	Zahnriemen	L	linke Spannscheibe mit Halterung
a_a	Achsabstand = 948 mm	A, B	Strichmarkierung auf den Spannscheibenhalterungen
l_T	schwingungsfähige Trumlänge	C	mittige Strichmarkierung auf dem Maulschlüssel

Tabelle 4.3: Legende zu Abbildung 4.2.

Eine fehlerhafte Vorspannung kann nach [25] zu den folgenden Problemen führen:
Bei einer zu geringen Vorspannung:

- Das Leertrum kann auf die Zahnscheibe des Abtriebs hochlaufen. Dabei wird der Zahnriemen zusätzlich gedehnt.
- Bei einem völligen Auflaufen kann die zulässige Seilzugkraft überschritten werden. Die Folge wäre ein Gewaltbruch.
- Der Flankenverschleiß nimmt infolge der erhöhten Reibkräfte beim Einzahnen zu.

Bei einer zu großen Vorspannung:

- Eine zu große Vorspannung zieht eine erhöhte Wellenlagerbelastung mit sich.
- Die übertragbare Leistung wird vermindert.
- Der Verschleiß der Riemenzähne nimmt zu.

Zur Prüfung der aufgebrachten Vorspannung können zwei Verfahren angewendet werden. Dabei wird die Vorspannkraft entweder aus der hervorgerufenen Dehnung des Riemens oder aus der Eigenfrequenz des gespannten Riemens ermittelt.
Der verwendete Zahnriemen erlaubt eine relative Dehnung ε von 4 mm/m, wenn die zulässige Seilzugkraft von 3500 N erreicht ist. Daraus ergibt sich die folgende Bestimmungsgleichung für die Vorspannkraft F_V:

$$F_V = \frac{3500\ \text{N}}{4\ \frac{\text{mm}}{\text{m}}} \cdot \underbrace{\frac{\Delta l}{l}}_{=\varepsilon} \qquad (4.7)$$

Δl Riemendehnung [mm]
l Bezugslänge des Riemens [m]
F_V Vorspannkraft [N]

Aus der Eigenfrequenz lässt sich die Riemenkraft folgendermaßen bestimmen:

$$F_V = 4 \cdot m \cdot l_T^2 \cdot f^2 \qquad (4.8)$$

m spezifische Riemenmasse [kg/m]
l_T schwingungsfähige Trumlänge [m]
f Frequenz der Riemenschwingung [Hz]
F_V Vorspannkraft [N]

Es wurden die minimale und die maximale Vorspannung mit beiden Verfahren ermittelt. Dabei wurde die gemessene Dehnung auf eine Länge l von 0,490 m bezogen.
Zur Messung der Eigenfrequenz wurde der Riemen durch einen Schlag auf die gestreckte Länge angeregt. Die Messung erfolgte zum einen mit einem Laser-Vibrometer, das auf den Riemenrücken gerichtet war, und zum anderen mit einem Elektretmikrofon, welches sich in

der Nähe der schwingenden Trumlänge befand. Die schwingungsfähige Trumlänge l_T betrug etwa 0,57 m.
Aus Tabelle 4.4 ist der Unterschied zwischen beiden Messmethoden zu erkennen.

Vorspannung	**[mm]** ε	**[Hz]** $f_{Mikrofon}$	**[Hz]** $f_{Vibrometer}$	**[N]** $F_{V,Dehnung}$	**[N]** $F_{V,\ Mikrofon}$	**[N]** $F_{V,\ Vibrometer}$
minimal	0,25	45	45,8	446	363	376
maximal	1,75	78	78	3125	1091	1091

Tabelle 4.4: Ergebnisvergleich unterschiedlicher Verfahren zur Prüfung der Riemenvorspannung.

Das Signal des Laser-Vibrometers wurde mit dem HP-Analysator bei einer Frequenzspanne von 100 Hz und einer Auflösung von 0,25 Hz analysiert. Das Mikrofonsignal wurde über die Soundkarte eines Laptops eingelesen und unter DASYLab ausgewertet. Hier betrug die Frequenzauflösung 1,35 Hz bei einer Abtastung von 44100 Hz. Eine Kalibrierung der beiden Systeme erfolgte nicht, da nur die Frequenzinformation benötigt wurde.
Tabelle 4.5 gibt die Eigenfrequenzen des Vorgespannten Riemens wieder. In diesem Zustand sind beide Trumstränge gleich gespannt. Im Betrieb steigt die Zugkraft im Lasttrum an, während sie im Leertrum abnimmt.

Vorspannung minimal	**[Hz]** $f_{Mikrofon}$	**[Hz]** $f_{Vibrometer}$	**[N]** $F_{V,\ Mikrofon}$	**[N]** $F_{V,\ Vibrometer}$
Lastrum	52	51	485	466
Leertrum	39	39	273	273

Tabelle 4.5: Vergleich zwischen der Messung mit einem Mikrofon und einem Vibrometer.

Die Ergebnisse (Tabelle 4.4 und Tabelle 4.5) zeigen eine gute Übereinstimmung der Messungen mit der Soundkarte und dem Vibrometer. Das bedeutet, dass die Vorspannungseinstellung mit Hilfe einer akustischen Messung überprüft werden kann.
Die Methode der Dehnungsmessung erwies sich als problematisch, weil die gemessenen Dehnungen klein waren und nur geringfügig über der Messgenauigkeit lagen. Für die Längenmessungen wurde ein Lineal mit einer 0,5 mm-Teilung verwendet.

5 Berechnung des Gestells

Das Testgestell und die darauf aufbauende, endgültige Gestellkonstruktion (Abbildung 5.1) hielten der Belastung durch den Drehkanal und seines Antriebs stand. Die Last des Drehkanals wird über die Längsträger (1) in die senkrechten Stützen (2) geleitet. Beide Gestellelemente sind über Verbindungswinkel (3) miteinander verbunden. Folglich müssen diese Winkel für die auftretende Belastung, die sich aus Kräften und Biegemomenten zusammensetzt, ausgelegt sein.

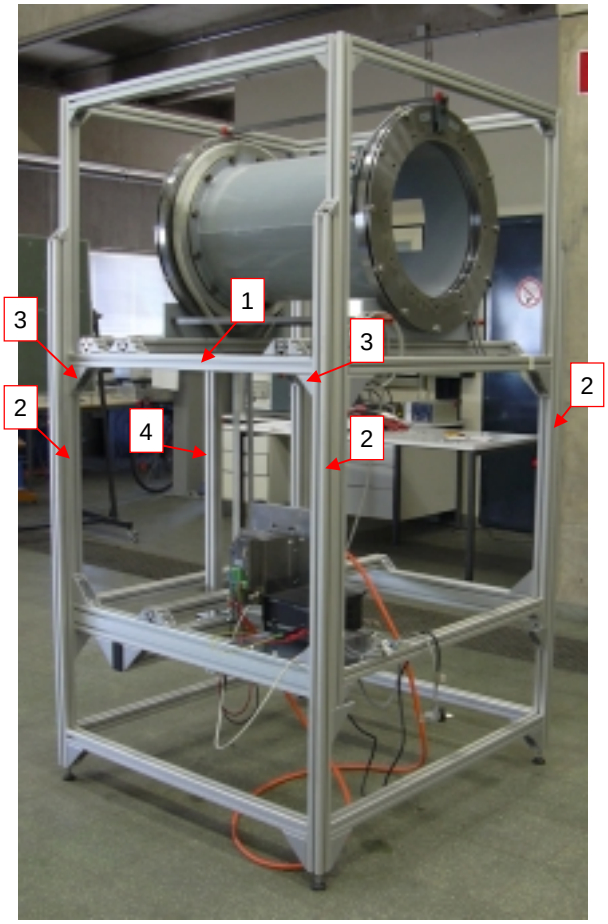


Abbildung 5.1: Endgültige Gestellkonstruktion samt Drehkanal.

Die in den nachfolgenden Abschnitten dokumentierten Berechnungen sollten prüfen, ob die Winkel (3) und ausgewählte Profilelemente des Gestells überlastet werden.

Im Zuge dieser Nachberechnung wurden zunächst manuelle Berechnungen an dem Rahmen (1) durchgeführt, auf dem der Drehkanal ruht. Anschließend wurde in einem weiteren Schritt das gesamte Gestell mit Hilfe der Finiten Elemente Methode (FEM) berechnet. Allen Berechnungen standen als Belastung die Auflagerkräfte des Drehkanals zugrunde, die aus drei Be-

lastungsfällen hervorgingen. Der erste Fall berücksichtigte lediglich die Gewichtskraft des Drehkanals, im zweiten Schritt wurde zusätzlich die maximale Wellenbelastung durch den Riemenantrieb hinzugezogen. Schließlich wurde im letzten Schritt die Wellenbelastung durch Schätzen eines realistischen Belastungszustandes reduziert (vgl. Abschnitt 4). Ausgehend von den Ergebnissen der FEM-Betrachtung wurde außerdem die senkrechte Entlastungsstütze (4) hinsichtlich ihrer Knickgefahr gemäß DIN 4113 T 1 („Aluminiumkonstruktionen unter vorwiegend ruhender Belastung“) untersucht.

5.1 Die verwendeten Profile

Die Profile des Gestells bestehen aus der Aluminiumlegierung Al Mg Si 0,5 F 25, weitere Werkstoffdaten sind Anhang 20.8 zu entnehmen. Verwendet wurde das „Profil 8 leicht“ aus dem Systembaukasten der Firma item [21]. In den Berechnungen wurden sie als Balken, unter Berücksichtung ihrer tatsächlichen Querschnittsdaten (Abbildung 5.2), idealisiert.

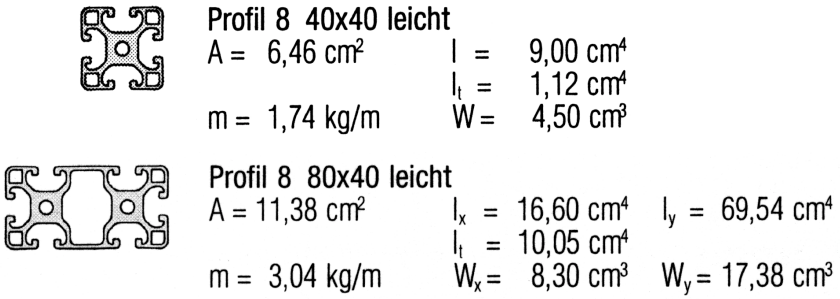


Abbildung 5.2: Daten der beiden im Gestell verbauten Profilarten [21]: Links sind die Querschnittsflächen dargestellt.

5.2 Das Koordinatensystem

In den nachfolgenden Berechnungen wird zwischen dem lokalen und dem globalen Koordinatensystem unterschieden. Das lokale Koordinatensystem ist elementbezogen und richtet sich nach dessen Lage. Abbildung 5.3 macht dies für ein geschnittenes Balkenelement deutlich. Die x-Achse des lokalen Koordinatensystems verläuft stets in Richtung der Längsachse des Balkens. Die Indizierung der Schnittgrößen erfolgt stets im lokalen Koordinatensystem. In den manuellen Berechnungen werden die Indizes aus Abbildung 5.3 durch eine Ortsangabe ergänzt, so dass beispielsweise das Moment um die z-Achse in Punkt F mit M_{zF} bezeichnet wird.

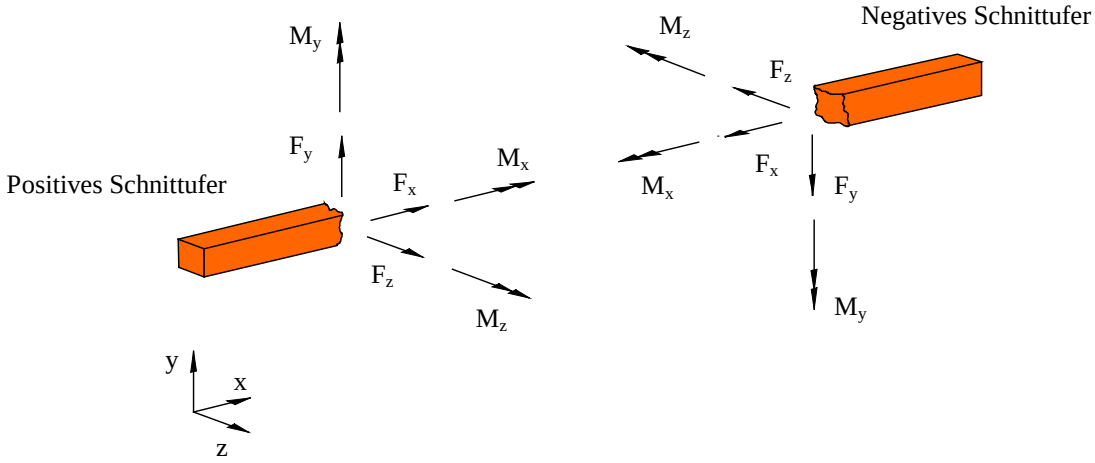


Abbildung 5.3:Lokales Koordinatensystem, Schnittgrößen am positiven und negativen Schnittufern jeweils in positiver Richtung.

Das globale Koordinatensystem ist dem lokalen übergeordnet, in ihm wird die Ausrichtung der einzelnen Balkenelemente beschrieben. Dieser Zusammenhang zwischen den beiden Koordinatensystemen ist auch bei der FEM zu beachten, wenn es darum geht, die relevanten Schnittgrößen zu analysieren. In Abbildung 5.4 wird die Orientierung des lokalen Koordinatensystems eines Balkenelements im Fall seiner Ausrichtung entlang der drei globalen Koordinatenachsen verdeutlicht. Jedes Element wird durch zwei Punkte (I) und (J) beschrieben. Das lokale Dreibein hat seinen Ursprung im ersten Punkt (I), von dort aus verläuft seine x-Achse längs des Elements.

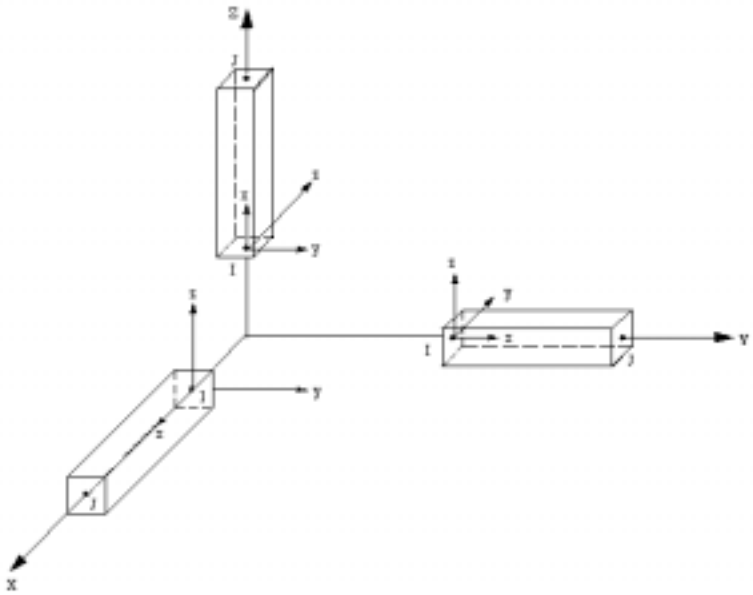


Abbildung 5.4: Orientierung des lokalen Koordinatensystems eines Balkenelements mit Ausrichtung entlang der globalen Koordinatenachsen.

5.3 Bestimmung der Auflagerkräfte des Drehkanals

Die für die Belastung der aufgestellten Modelle benötigten Auflagerkräfte des Drehkanals wurden für jeden der drei Belastungsfälle ermittelt. Dafür wurde der Drehkanal (Abbildung 5.5) als gelenkig gelagerter Balken betrachtet (Abbildung 5.6). Die Auflagerpunkte der Winkel (1) entsprachen dabei den Lagerungspunkten.

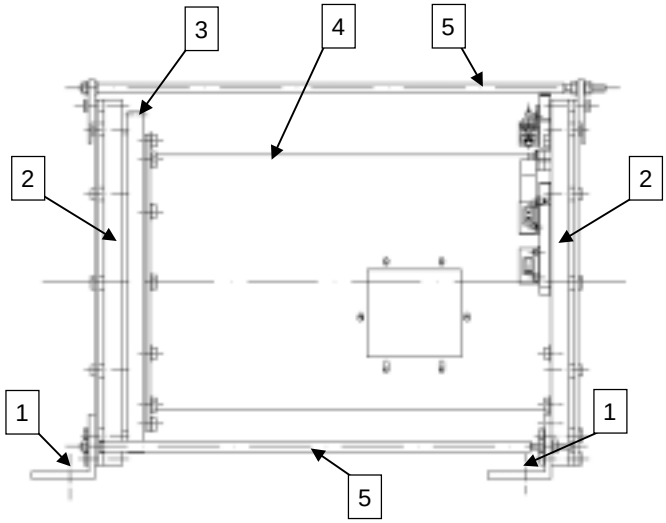


Abbildung 5.5: Zeichnung des Drehkanals:
1: Auflagepunkte der Winkel, 2: Drehflansch, 3: Zahnscheibe, 4: Drehkanalrohr, 5: Spannstangen.

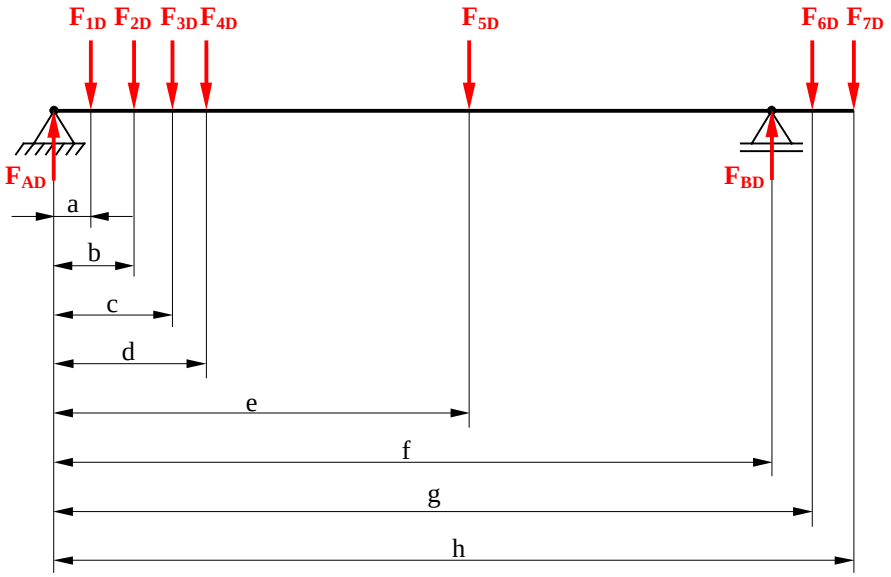


Abbildung 5.6: Als Balken idealisierter Drehkanal mit den Belastungen durch die einzelnen Komponenten: Die Benennung der einzelnen Kräfte und die Längen sind Tabelle 5.1 zu entnehmen.

Aus Abbildung 5.6 ergeben sich die folgenden Gleichung zur Bestimmung der Auflagerkräfte F_{AD} und F_{BD}:

$$F_{AD} = \sum_{i=1}^{7} F_{iD} - F_{BD} \qquad (5.1)$$

$$F_{BD} = \frac{F_{1D} \cdot a + F_{2D} \cdot b + F_{3D} \cdot c + F_{4D} \cdot d + F_{5D} \cdot e + F_{6D} \cdot g + F_{7D} \cdot h}{f} \qquad (5.2)$$

Bezeichnung	Benennung	[N] Kraft	Länge	[mm] Maß
F_{1D}	Gewichtskraft des Stahlwinkels	73	a	12
F_{2D}	Gewichtskraft des Drehflansches auf der Antriebsseite	342	b	61
F_{3D}	Gewichtskraft des Absatzes der Zahnscheibe	19	c	84
F_{4D}	Gewichtskraft des Zahnkranzes der Zahnscheibe	65 + F_W*	d	104
F_{5D}	Gewichtskraft des Rohres	192	e	461
F_{6D}	Gewichtskraft des Stahlwinkels	73	f	714
F_{7D}	Gewichtskraft des zweiten Drehflansches	367	g	726
			h	775

*Tabelle 5.1: Benennung und Angabe der einzelnen Kräfte, sowie der einzelnen Abschnittslängen, * F_W s. Tabelle 5.2.*

Die drei Belastungsfälle wurden generiert, indem zu der Gewichtskraft der Zahnscheibe F_{4D} die jeweils wirkende Wellenbelastung des Riemenantriebs hinzuaddiert wurde. Daraus ergaben sich die folgenden Belastungsfälle:

Belastungsfall	[N] Wellenbelastung F_W	[N] F_{AD}	[N] F_{BD}
1	0	492	639
2	3000	3055	1076
3	450	877	705

Tabelle 5.2: Berücksichtigte Belastungsfälle.

Die Lagerreaktionen F_{AD} und F_{BD} wurden in Abhängigkeit der einzelnen Kräfte und Längen mit einem Tabellenkalkulationsprogramm berechnet. In den Nachberechnungen gingen die Kräfte F_{AD} als F_1 und F_{BD} als F_2 ein.

5.4 Erster Schritt: Manuelle Berechnung

Die manuelle Berechnung bediente sich zweier Vereinfachungen des Problems. Um die gesuchten Belastungen der Winkel zu ermitteln, wurde zum einen nur der relevante Gestellteil

betrachtet. Dies war der Rahmen auf dem der Drehkanal im Gestell ruht (Abbildung 5.7). Zum anderen wurde dieser Rahmen statt durch die tatsächlich auftretenden Streckenlasten, durch Punktlasten in den Punkten I und J belastet. Die Lagerung der Längsträger auf den Verbindungswinkeln wurde durch die Punkten A, D, E und H ersetzt.

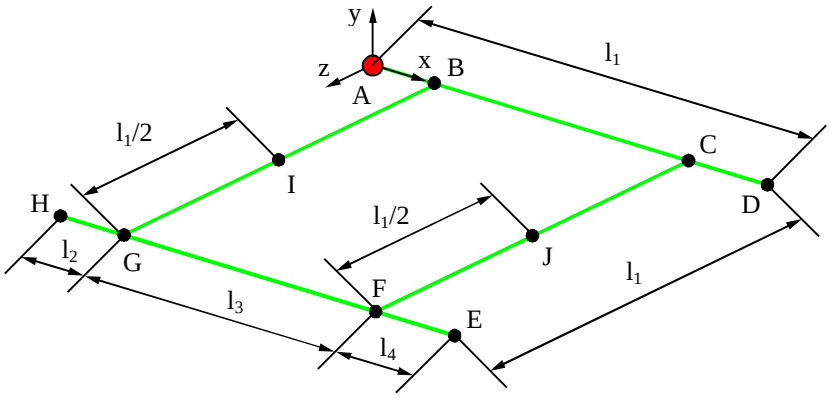


Abbildung 5.7: Skizze des isolierten Tragrahmens, auf dem der Drehkanal ruht: Die gesuchten Belastungen der Verbindungswinkel sind in den Punkten A, D, E und H zu berechnen. Die Belastungen wurden als Punktlasten auf die beiden Querträger zwischen B und G und zwischen C und F aufgebracht. Knoten A stellt den Ursprung des globalen Koordinatensystems dar.

Die Profile des Gestells sind zwar fest miteinander verschraubt, jedoch erreichen die Verbindungen aufgrund der Nachgiebigkeit der Profile nicht ganz den Charakter von festen Einspannungen. In der manuellen Berechnung wurden daher zwei Grenzfälle betrachtet, von denen angenommen wurde, dass sich der reale Fall zwischen ihnen befände.

Die erste Annahme ging davon aus, dass der Tragrahmen an den Punkten A, D, E und H gelenkig gelagert ist (Abbildung 5.8). Außerdem sollten an den Verbindungsstellen B, C, F und G keine Momente, sondern lediglich vertikale Kräfte übertragen werden können. Diese Betrachtungsweise ergab erhöhte Biegemomente zwischen den Gelenkpunkten.

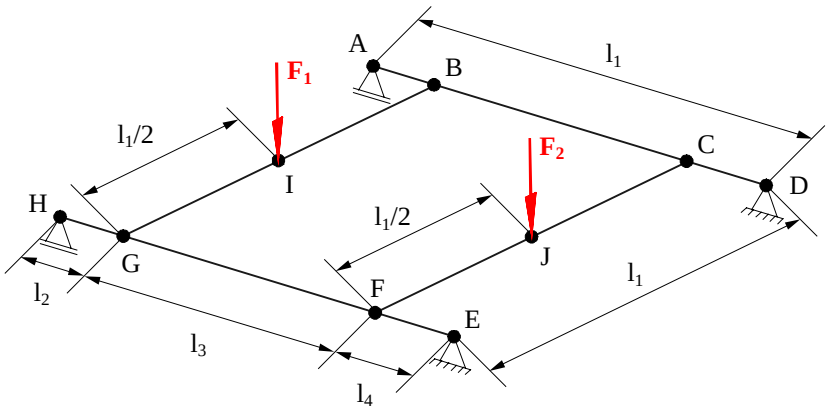


Abbildung 5.8: Der belastete, isolierte Tragrahmen mit gelenkigen Verbindungen und Lagerungen.

In der zweiten Annahme lagen an allen Verbindungs- und Lagerungspunkten des isolierten Tragrahmens feste Einspannungen vor (Abbildung 5.9). Dadurch wurden höhere Lager-momente als im realen System berechnet.

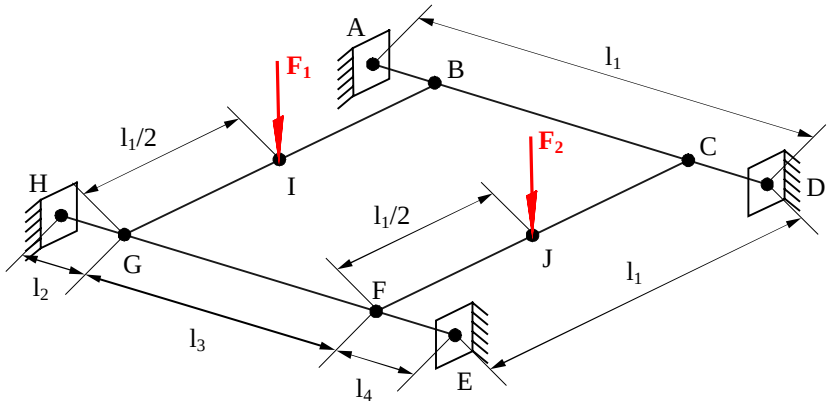


Abbildung 5.9: Durch Einzelkräfte belasteter Tragrahmen des Drehkanalgestells: An den Verbindungen (Knoten) werden Momente übertragen.

Für beide Annahmen wurden die Lagerreaktionen in Abhängigkeit der relevanten Längen und der aufgebrachten Kräfte formuliert. Damit konnten Veränderungen in der Geometrie oder in der Belastung, sofern sie die Gültigkeit der hergeleiteten Gleichungen nicht berührten, leicht berücksichtigt werden. Die Berechnung der eigentlichen Lagerreaktionen erfolgte schließlich in einer Tabellenkalkulation.

Die grundlegende Vorgehensweise war bei beiden Annahmen gleich. Zunächst wurden die Querträger freigeschnitten und deren Lagerreaktionen gemäß den Annahmen berechnet. Diese wurden in einem weiteren Schritt als Belastungen auf die ebenfalls freigeschnittenen Längsträger übertragen. Deren Legerreaktionen entsprachen den gesuchten Belastungen der Verbindungswinkel.

Die beiden Querträger (B-G und C-F) bildeten identische mechanische Teilsysteme, ebenso verhielt es sich mit den Längsträgern (A-D und E-H). Es reichte daher aus, jeweils eines dieser Teilsysteme zu behandeln und die gewonnenen Gleichungen auf das jeweils andere Teilsystem zu übertragen.

5.4.1 Erste Annahme: Gelenkige Verbindungsstellen

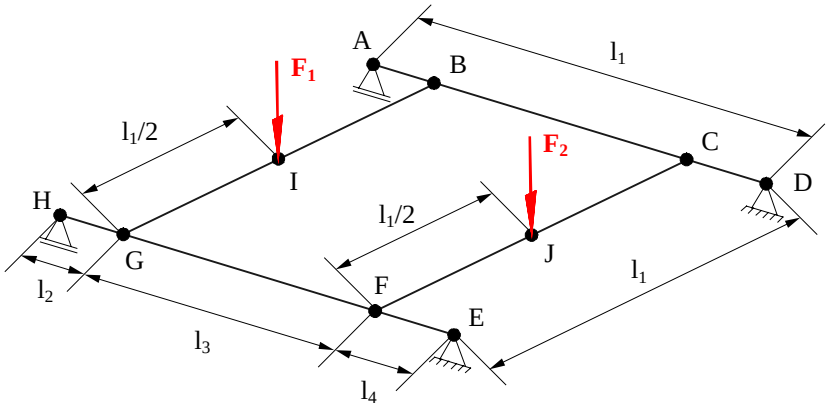


Abbildung 5.10: Berechneter Tragrahmen mit gelenkigen Verbindungsstellen.

Aus dieser Annahme gingen aufgrund der gelenkigen Lagerungen nur statisch bestimmte Teilsysteme (Abbildung 5.11 und Abbildung 5.12) hervor.

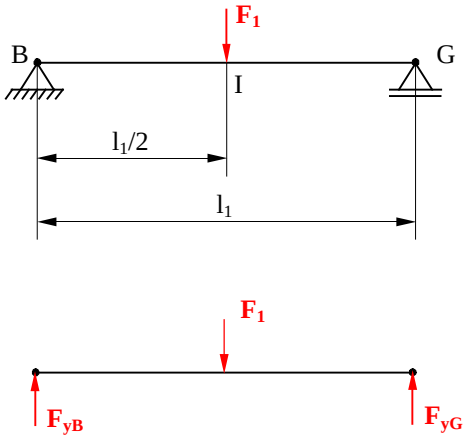


Abbildung 5.11: Belasteter Querträger:
oben: Geometrie und Lagerung, unten: Freigeschnittener Träger (ohne Normalkräfte).

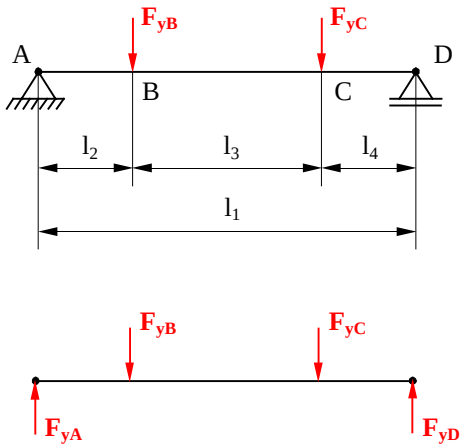


Abbildung 5.12: Mit den Lagerkräften der Querträger belasteter Längsträger: oben: Geometrie und Lagerung, unten: Freigeschnittener Träger (ohne Normalkräfte).

Aus den aufgeführten Teilsystemen gingen die folgenden Gleichungen zur Bestimmung der gesuchten Größen hervor:

$$M_{zI} = \frac{F_1}{2} \cdot \frac{l_1}{2} = \frac{1}{4} \cdot F_1 \cdot l_1 \qquad (5.3)$$

$$M_{zJ} = \frac{F_2}{2} \cdot \frac{l_1}{2} = \frac{1}{4} \cdot F_2 \cdot l_1 \qquad (5.4)$$

$$F_{yD} = \left(F_{yB} \cdot l_2 + F_{yC} \cdot \left(l_2 + l_3\right)\right) \cdot \frac{1}{l_1} = \frac{1}{2 \cdot l_1} \cdot \left(F_1 \cdot l_2 + F_2 \cdot \left(l_2 + l_3\right)\right) \qquad (5.5)$$

$$F_{yA} = F_{yB} + F_{yC} - F_{yD} = \frac{1}{2}\left(\left(F_1 + F_2\right) - \frac{1}{l_1} \cdot \left(F_1 \cdot l_2 + F_2 \cdot \left(l_2 + l_3\right)\right)\right) \qquad (5.6)$$

$$M_{zB} = F_{yA} \cdot l_2 \qquad (5.7)$$

$$M_{zC} = F_{yD} \cdot l_4 \qquad (5.8)$$

5.4.2 Zweite Annahme: Feste Einspannungen

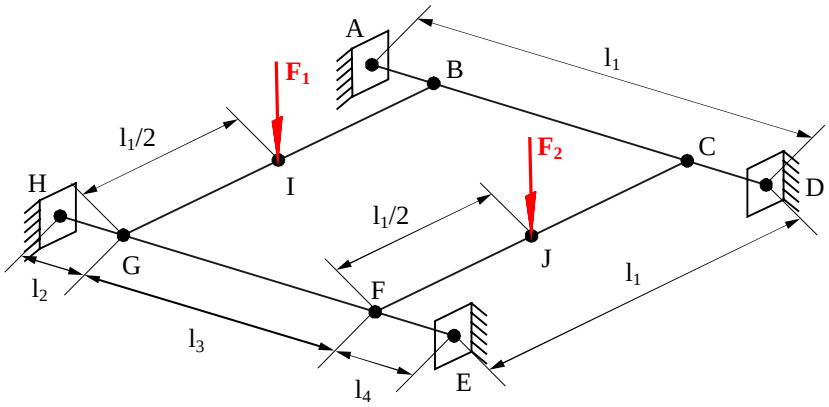


Abbildung 5.13: Berechneter Tragrahmen mit festen Verbindungsstellen und Einspannungen.

Aufgrund der Einspannungen entstanden nach dieser Annahme beim Schneiden stets statisch unbestimmte Belastungsfälle. Während die Querträger in diesem Fall einen Grundlastfall darstellten (Abbildung 5.14), mussten die Gleichungen für die Längsträger (Abbildung 5.15) hergeleitet werden.

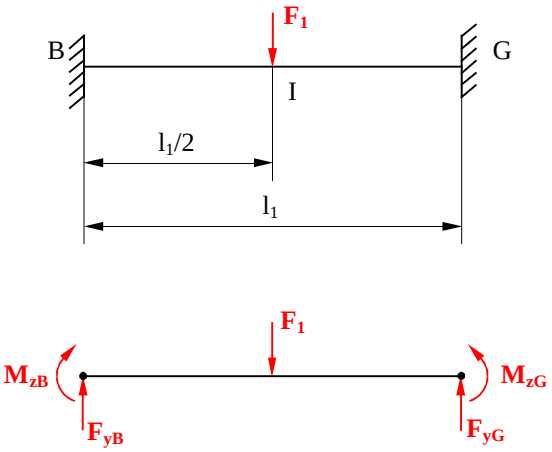


Abbildung 5.14: Belastung des beidseitig eingespannten Querträgers:
oben: Geometrie und Lagerung, unten: Freigeschnittener Träger (ohne Normalkräfte);
Dieser Belastungsfall ist ein Grundlastfall.

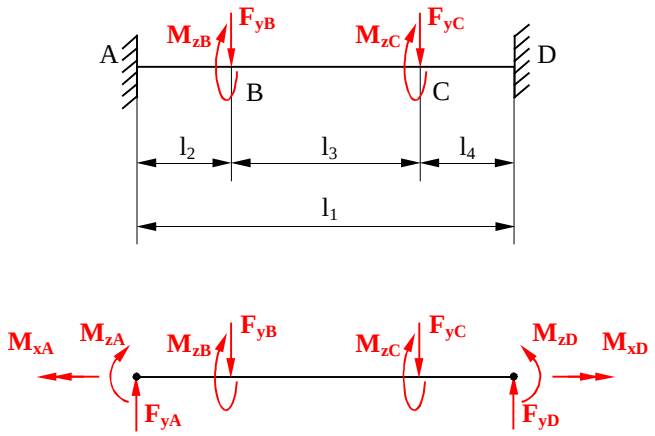


Abbildung 5.15: Mit den Lagerreaktionen der Querträge belasteter, beidseitig eingespannter Längsträgers: oben: Geometrie und Lagerung, unten: Freigeschnittener Träger (ohne Normalkräfte).

Um die Lagerreaktionen des eingespannten Längsträgers nach Abbildung 5.15 zu bestimmen, wurde das Prinzip der virtuellen Arbeit angewendet. Das bestehende System wurde in diesem Fall durch Entfernen der Lagerreaktionen am Punkt D statisch bestimmt gemacht. Daraus resultierte das sogenannte 0 -System. Indem anschließend nacheinander das System jeweils alleine durch eine der zuvor weggelassenen Lagerreaktionen belastet wurde, entstanden drei weitere Systeme (das 1-, 2- und 3-System). Zu jedem System war der Momentenverlauf zu bestimmen. Diese Verläufe wurden anschließend mit Hilfe der Koppeltafel (s. Anhang 20.4) miteinander gekoppelt, um die virtuellen Verschiebungen im Punkt D zu formulieren. Aus der Randbedingung, dass im Punkt D die Summe aller virtuellen Verschiebungen null sein muss, ließen sich die drei Unbekannten F_{yD}, M_{xD} und M_{zD} bestimmen.

Das 0-System entsprach einem einseitig eingespannten Balken. Die übrigen drei Systeme ergaben jeweils einen Grundlastfall, für den der Momentenverlauf bekannt war. Abbildung 5.16 zeigt eine Zusammenstellung dieser vier Systeme mit deren Momentenverläufen. Bei den beschrifteten Momenten entspricht der erste Index der Systemnummer, der zweite Index gibt die Position des Moments wieder. Ein nachgestelltes „T“ kennzeichnet ein Torsionsmoment.

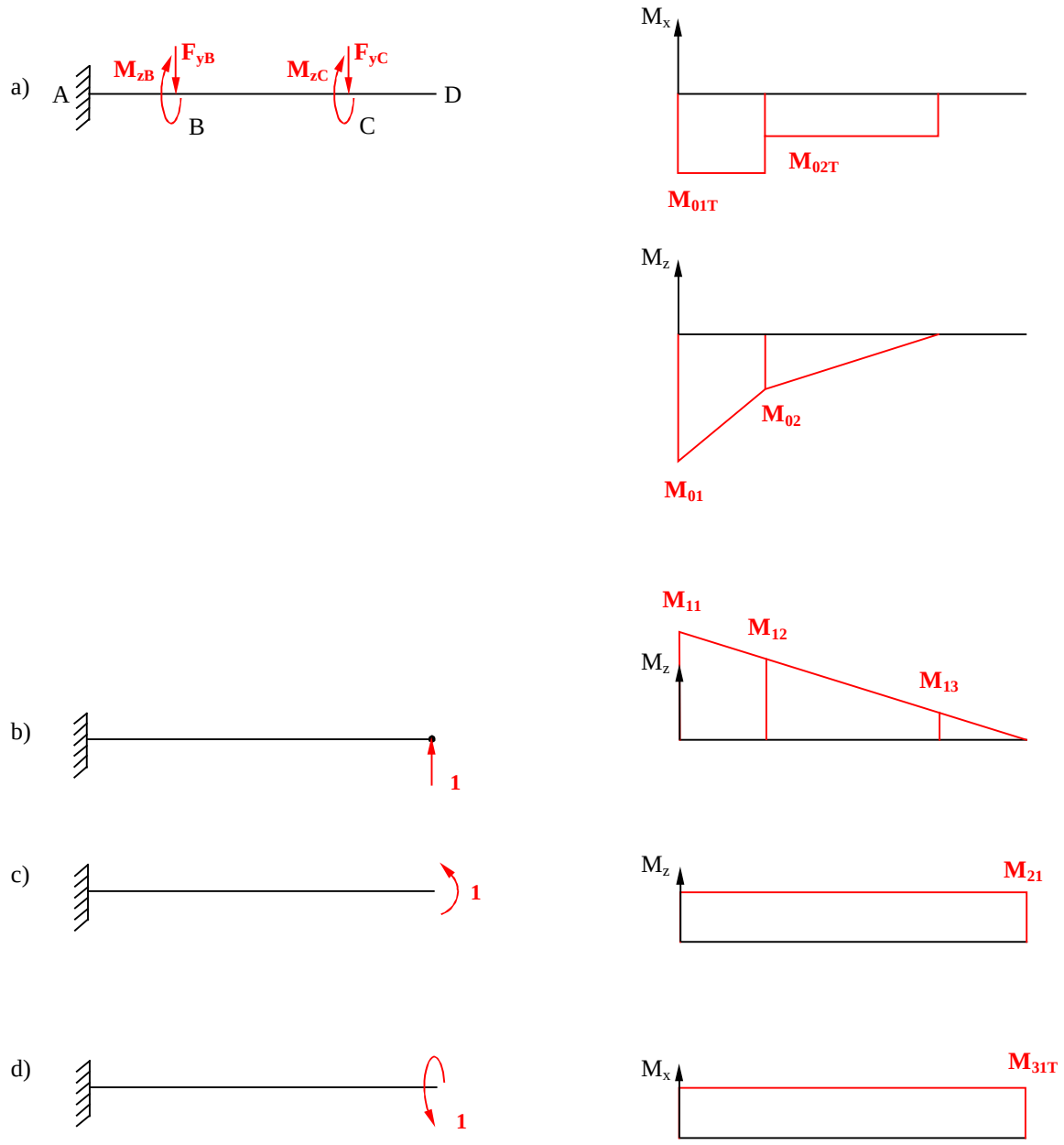


Abbildung 5.16: Gegenüberstellung der zu betrachtenden Systeme mit ihren Belastungen (links) und den dazugehörenden Momentenverläufen (rechts):
a) 0-System, b) 1-System, c) 2-System, d) 3-System.

Die oben beschriebene Randbedingung lässt sich durch folgendes Gleichungssystem beschreiben:

$$\delta_{i0} + \sum_{k=1}^{n} X_k \cdot \delta_{ik} = 0, \quad i = 1, 2 \ldots n \qquad (5.9)$$

δ_i virtuelle Verschiebungen
X_k statisch Unbestimmte

Die Koeffizienten X_k sind die gesuchten Lagerreaktionen. Die einzelnen Verschiebungen δ_i wurden mittels der Koppeltafel formuliert. Die Koppeltafel und die Formulierung der Ver-

schiebungen sind im Anhang zu finden. Das Gleichungssystem (5.9) vereinfachte sich durch Einsetzen der Gleichungen für die Verschiebungen:

I) $\delta_{10} + X_1\delta_{11} + X_2\delta_{12} = 0$
II) $\delta_{20} + X_1\delta_{21} + X_2\delta_{22} = 0$
III) $\delta_{30} + X_3\delta_{33} = 0$

Aus diesem Gleichungssystem gingen schließlich die gesuchten Lagerreaktionen hervor:

$$X_1 = \frac{\frac{\delta_{10} \cdot \delta_{22}}{\delta_{12}} - \delta_{20}}{\delta_{21} - \frac{\delta_{11} \cdot \delta_{22}}{\delta_{12}}} \quad \hat{=} \quad F_{yD} \qquad (5.10)$$

$$X_2 = -\frac{\delta_{10}}{\delta_{12}} - X_1 \cdot \frac{\delta_{11}}{\delta_{12}} \quad \hat{=} \quad M_{zD} \qquad (5.11)$$

$$X_3 = -\frac{\delta_{30}}{\delta_{33}} \quad \hat{=} \quad M_{xD} \qquad (5.12)$$

5.4.3 Ergebnisse der manuellen Berechnung

Die Berechnungen wurden in einem Tabellenkalkulationsprogramm durchgeführt. Die Ergebnisse beider Annahmen sind in Tabelle 5.3 aufgelistet.

		Fall 1	**Fall 2**	**Fall 3**	
Größe	**Annahme**	**F_1 = 492 N F_2 = 639 N**	**F_1 = 3055 N F_2 = 1076 N**	**F_1 = 877 N F_2 = 705 N**	**Einheit**
F_{yA} (= F_{yH})	1	263	1437	439	[N]
	2	254	1506	442	[N]
F_{yD} (= F_{yE})	1	303	628	352	[N]
	2	312	560	349	[N]
M_{zA} (= M_{zH})	1	0	0	0	[Nmm]
	2	24317	129847	40172	[Nmm]
M_{zD} (= M_{zE})	1	0	0	0	[Nmm]
	2	-32527	-65354	-37475	[Nmm]
M_{zI}	1	115620	717925	206095	[Nmm]
	2	57810	358963	103048	[Nmm]
M_{zJ}	1	150165	252860	165675	[Nmm]
	2	75083	126430	82838	[Nmm]

Tabelle 5.3: Ergebnisse gemäß der manuellen Berechnung zu den beiden Annahmen, unter Berücksichtigung der drei Belastungsfälle: Fall 1: Belastung durch die Auflagerkräfte des Drehkanals, Fall 2: Zusätzliche Belastung durch die maximale Riemenkraft, Fall 3: Belastung wie in Spalte 2, jedoch mit geschätzter Riemenkraft.

Aus dieser Gegenüberstellung ist zu entnehmen, dass die Biegemomente M_{zI} und M_{zJ} deutlich von der Vorgabe einer gelenkigen Lagerung (Annahme 1) oder einer Einspannung (Annahme 2) abhängen. Bei einer Einspannung der Profile nehmen sie kleinere Werte an.

5.5 Zweiter Schritt: Anwendung der FEM

Die angestellte Betrachtung mittels der FEM diente der genaueren Ermittlung der Biegemomente an den Befestigungswinkeln und sollte helfen, die Ergebnisse aus dem ersten Schritt zu beurteilen. Außerdem konnten durch die Modellierung des gesamten Gestells auch Ergebnisse weiterer Gestellpunkte eingeholt werden.

Bei der Überführung des Drehkanalgestells in ein FEM-Modell wurden Vereinfachungen vorgenommen, um den Modellierungsaufwand zu reduzieren:

- Es wurden feste Verbindungen zwischen den Profilen angenommen, ohne die Winkelsätze zu berücksichtigen.
- Ebenso wurden die Zweiteilung des Gestells zur Höhenverstellung und der Befestigungsrahmen für die Positioniersteuerung und das Netzteil (vgl. Abbildung 3.2) nicht in das Modell übernommen.
- Die Belastung wurde rein statisch angesetzt, wobei die Gewichtskraft des Drehkanals und die Riemenkraft einflossen.
- Des Weiteren blieben die Antriebsmomente unberücksichtigt.
- Die radiale Wellenbelastung wurde im Modell nicht an einer Motorwelle, sondern direkt am Profil an angesetzt.
- Die Motorhalterung wurde durch ein hochkant stehendes 80 x 40-Profil ersetzt.
- Die Stellfüße wurden durch Festlager simuliert.

5.5.1 Anwendung der FEM auf einen Beispielfall

Um die Modellierung einer festen Verbindung zwischen zwei Profilen zu testen, wurde ein gut nachzurechnendes Beispiel betrachtet. Der Belastungsfall ist in Abbildung 5.17 skizziert. Dabei kam es besonders auf die Schnittgrößen F_{yA}, M_{zA} und M_{xA} im Punkt A an, weil dieser im späteren Gestellmodell Verbindungspunkten zu benachbarten Profilen entsprach.

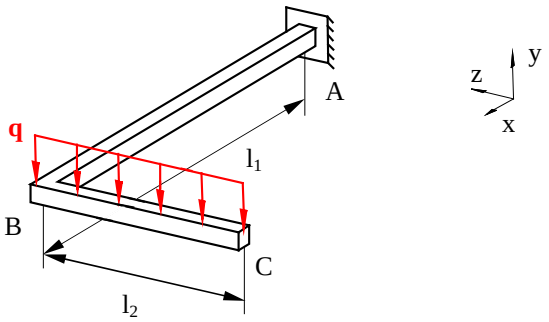


Abbildung 5.17: Beispielfall für eine momentenübertragene Verbindung (B).

Tabelle 5.4 führt die zu Abbildung 5.17 gehörenden Größen auf.

Größe	Wert	Einheit
l_1	1000	[mm]
l_2	500	[mm]
q	0,5	[N/mm]

Tabelle 5.4: In Abbildung 5.17 eingetragene Größen.

Auf eine Herleitung der einzelnen Bestimmungsgleichungen wird an dieser Stelle verzichtet. In der nachfolgenden Tabelle sind die Gleichungen für die analytische Rechnung zusammen mit den Ergebnissen aus deren Anwendung und der FEM-Berechnung aufgestellt.

	Bereich	Gleichung	Analytisch	ANSYS	Einheit	[%] Abw.
Abgewinkelter Kragbalken	A-B	$F_{yA} = q \cdot l_2$	250	250	[N]	0
	A-B	$M_{xA} = -\frac{1}{2} \cdot q \cdot l_2^2$	-62500	-62500	[Nmm]	0
	A-B	$M_{zA} = -q \cdot l_2 \cdot l_1$	-250000	-250000	[Nmm]	0
	A-B	$M_{xB} = M_{xA}$	-62500	-62500	[Nmm]	0
	A-B	$M_{zB} = 0$	0	$-0{,}34366 \cdot 10^{-6}$	[Nmm]	$34 \cdot 10^{-6}$
	B-C	$M_{zB} = -\frac{1}{2} \cdot q \cdot l_2^2$	-62500	-62500	[Nmm]	0
	B-C	$M_{zC} = 0$	0	$-0{,}32783 \cdot 10^{-6}$	[Nmm]	$33 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 5.5: Aufstellung der Ergebnisse der analytischen Berechnung und der FEM (ANSYS), sowie den prozentualen Abweichungen der FEM-Lösungen bezogen auf die analytischen Ergebnisse. Die Angaben zu den Bereichen beziehen sich auf Abbildung 5.17.

Aus der Tabelle 5.5 geht eine Übereinstimmung der Lösungen aus der FEM-Berechnung mit den analytisch gewonnenen Ergebnissen hervor. Die Art der festen Profilverbindung konnte demnach in die Gestellsimulation übernommen werden.

5.5.2 Gestaltung des FEM-Modells

Die Umsetzung der oben beschriebenen Vereinfachungen veranschaulicht die Gegenüberstellung in Abbildung 5.18. Dabei wurde trotz seiner Symmetrie das gesamte Gestell simuliert, weil die Geometrie gut zu handhaben war.

Bei der Modellgenerierung wurden die Materialeigenschaften der Profile, wie sie vom Hersteller angegeben werden, berücksichtigt (vgl. Anhang 20.8 und Abbildung 5.2, S. 26).

Die Profile wurden mit dem Element „BEAM4“ modelliert. Dieser Elementtyp erlaubt eine dreidimensionale Modellierung und erfordert für seine geometrische Darstellung nur zwei Punkte (vgl. Abbildung 5.4, S. 27). Über elementenspezifische Eingaben werden Informationen über die Breite und Höhe der Elemente, der Querschnittsfläche und der Flächenträgheitsmomente weitergegeben.

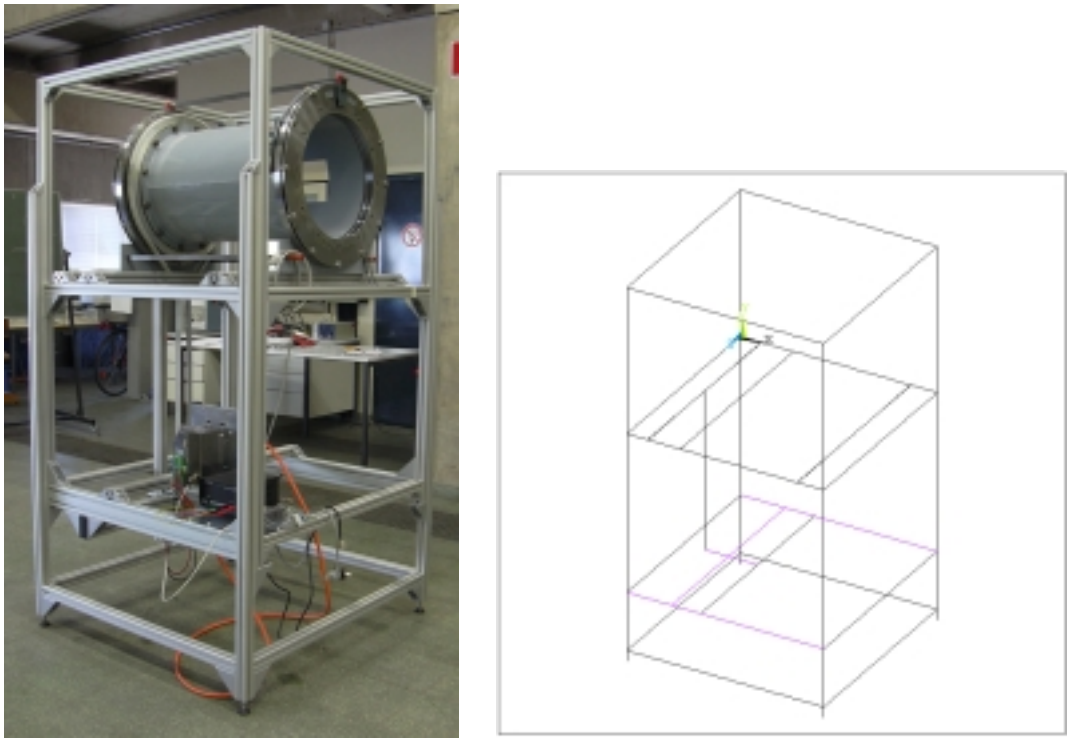


Abbildung 5.18: Gegenüberstellung des realen Drehkanalgestells (links) und des FEM-Modells (rechts) in seiner Elementdarstellung.

Nachfolgend wird das verwendete FEM-Modell dargestellt. Abbildung 5.19 zeigt das Modell des Drehkanalgestells mit den aufgebrachten Belastungen und den parametrisierten Längen.

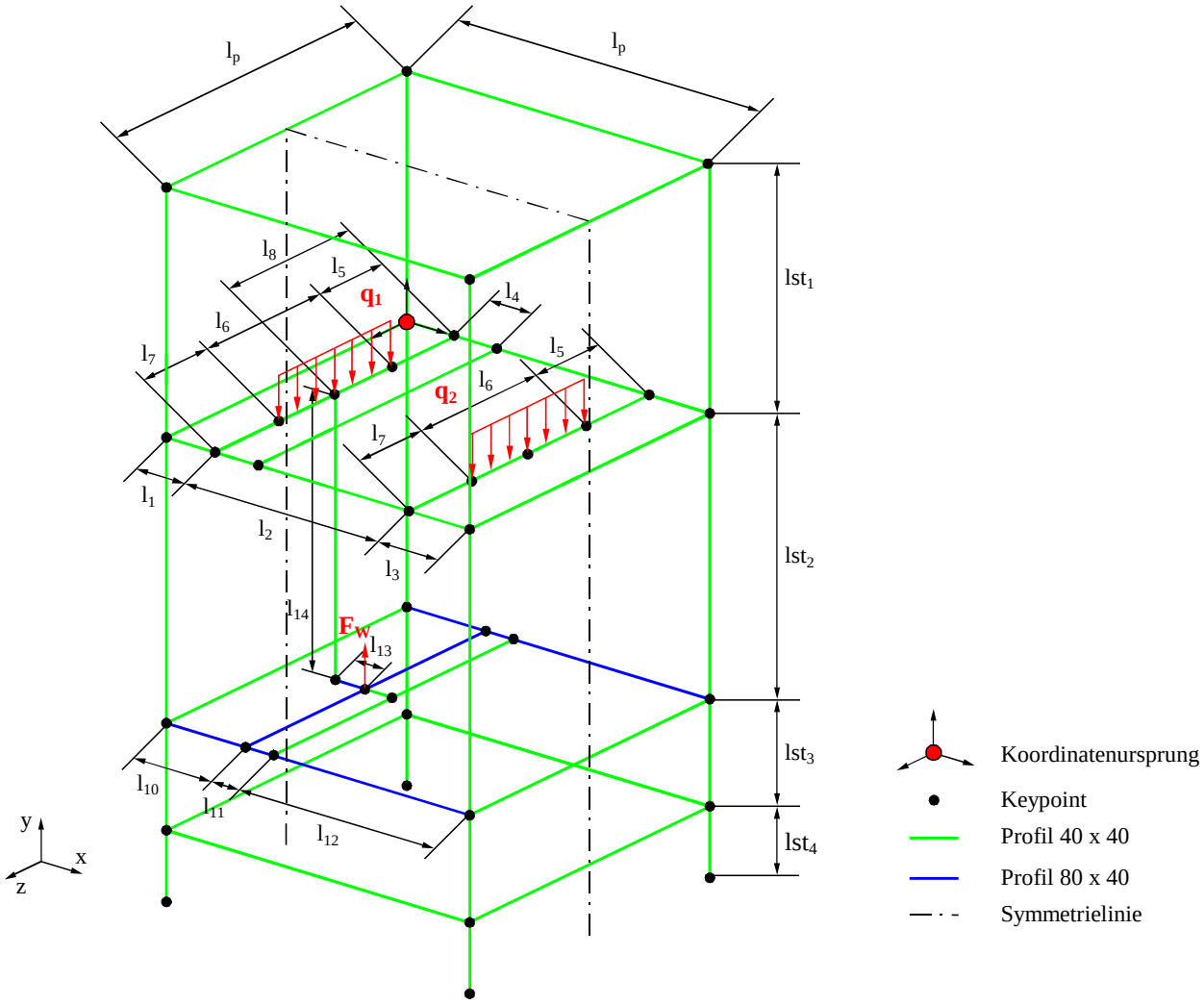


Abbildung 5.19: FEM-Modell des Drehkanalgestells mit den Abschnittslängen (vgl. Tabelle 5.6); „Keypoints“ sind die Eckpunkte der Geometrie, durch die die Linien beschrieben werden.

Größe	[mm] Länge
l_p	940
lst_1	705
lst_2	765
lst_3	310
lst_4	100
l_1	100
l_2	714
l_3	$= l_p - l_1 - l_2 = 126$
l_4	154

Größe	[mm] Länge
l_5	230
l_6	500
l_7	$= l_5 = 230$
l_8	$= l_5 + (l_6 / 2) = 480$
l_{10}	214
l_{11}	139
l_{12}	$= l_p - l_{10} - l_{11} = 587$
l_{13}	113
l_{14}	765

Tabelle 5.6: Längen des FEM-Modells in Abbildung 5.19.

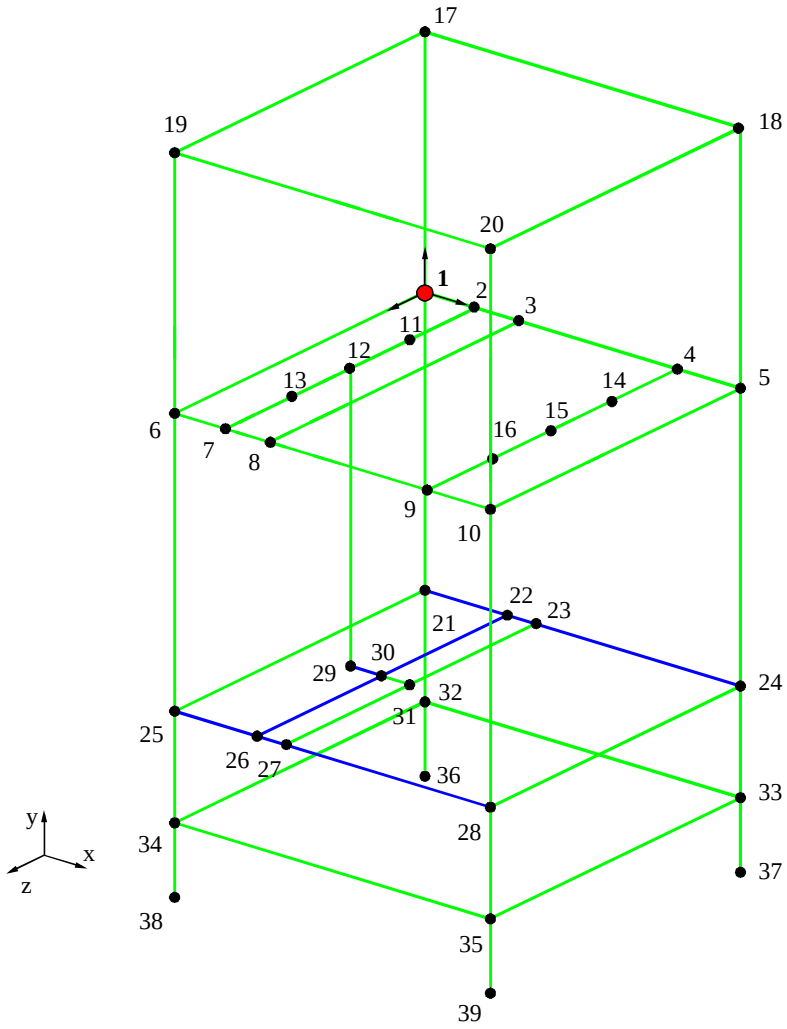


Abbildung 5.20: FEM-Modell des Drehkanalgestells mit der „Keypoint“-Nummerierung.

Abbildung 5.21 zeigt das generierte Modell mit der Darstellung der Information über die Breite und Höhe der Elemente. Dunklere Bereiche kennzeichnen eine erhöhte Elementauflösung, die für genauere Ergebnisse erforderlich ist.

Wie schon in Abschnitt 5.4 beschrieben, waren besonders die Ergebnisse an den Punkten 1, 5, 6 und 10 erfragt. Aufgrund der Symmetrie des Modell reichte es aus, nur die Punkte 1 und 5 des Trägers zwischen diesen Punkten zu betrachten. Außerdem wurden zusätzlich Ergebnisse bezüglich der Belastung der kleinen Winkel (vgl. Abbildung 5.23, S. 46) der Träger zwischen den Punkten 25 und 21, bzw. zwischen den Punkten 28 und 24 ausgewertet. Schließlich kam die Betrachtung der Stütze zwischen den Punkten 30 und 12 hinzu.

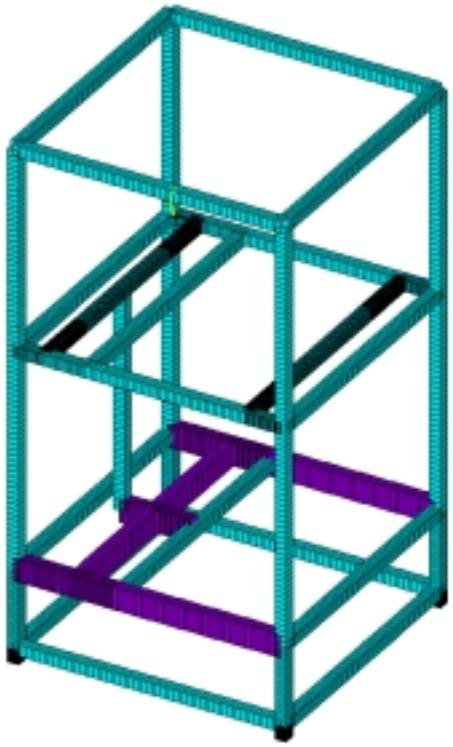


Abbildung 5.21: Darstellung der Elementauflösung des Gestellmodells.

5.6 Auswertung der Ergebnisse

Die Beurteilung der Ergebnisse (Abbildung 5.22) erfolgt hinsichtlich der folgenden Gesichtpunkte:

1. Belastung der Verbindungswinkel an den Punkten 1 und 5 (Abbildung 5.20), sowie der Winkel an den Punkten 21 und 24,
2. Biegebelastung der Querträger,
3. Belastung der Entlastungsstütze.

Kräfte und Momente an ausgewählten Punkten (KP) des Gestells
Ergebnisse der manuellen Berechnung und der FEM

			Fall 1		Fall 2		Fall 3			zul. Werte		
Element	**KP**	**P**	**F_y**	**M_z**	**F_y**	**M_z**	**F_y**	**M_z**		**F_y**	**M_z**	**Winkel-Gr.**
121	1		-260	-22162	-1458	-88260	-440	-32097	OST	2000	150000	gr.
			-121	-17396	-423	-50725	-167	-22410	MST			
		A	263	0	1437	0	439	0	MB 1			
			254	24317	1506	129847	442	40172	MB 2			
230	5		305	-24420	607	-68225	351	-31010	OST	2000	150000	gr.
			287	-18026	476	-23255	315	-18823	MST			
		D	303	0	628	0	352	0	MB 1			
			312	-32527	560	-65354	349	-37475	MB 2			
1081	21		4,5E-09	-165	-1,7E-09	-1864	3,6E-09	-420	OST	1000	50000	kl.
			-3,6E-08	51	-1,6E-07	-233	-5,5E-08	9	MST			
1141	24		-5,5E-09	-188	-2,2E-09	-450	-5,0E-09	-227	OST	1000	50000	kl.
			3,6E-08	-204	1,7E-07	-654	5,6E-08	-272	MST			
2021 (OST)	21		-1	-3652	1177	60574	176	5979	OST	2000	150000	gr.
2071 (MST)			-138	-13757	156	-10577	-94	-13169	MST			
2160 (OST)	24		-1	-2531	-323	43191	-49	4334	OST	2000	150000	gr.
2210 (MST)			19	-3017	-177	37564	-10	3067	MST			
450	12		-3	73836	-19	457900	-5	131530	OST			
			154	8487	1148	-33959	304	3206	MST			
		I	---	115620	---	717925	---	206095	MB 1			
			---	57810	---	358963	---	103048	MB 2			
730	15		-4	100550	-7	169790	-4	111010	OST			
			-4	100480	-7	169260	-4	110870	MST			
		J	---	150165	---	252860	---	165675	MB 1			
			---	75083	---	126430	---	82838	MB 2			

MST	Mit Stütze	**MB 1**	Annahme 1 (gelenkige Lagerung)
OST	Ohne Stütze	**MB 2**	Manuelle Berechnung Annahme 2 (eingespannte Lagerung)
F_y	Kraft [N]	**Element**	Nummer des Elements im FEM-Modell
M_z	Biegemoment [Nmm]	**KP**	Nummer des "Keypoints" im Modell
		P	Punkt aus dem Modell der manuellen Berechnung

zul. Werte Grenzwerte des Herstellers für die Belastung der Verbindungswinkel
kl. kleine Verbindungswinkel (Winkel 8 40x40)
gr. große Verbindungswinkel (Winkel 8 80x80)

Normalkräfte und Biegemomente in der Entlastungsstütze

		Fall 1		Fall 2		Fall 3		
Element	**KP**	**F_x**	**M_z**	**F_x**	**M_z**	**F_x**	**M_z**	
1261	29	-315	-26184	-2334	-1,68E+05	-618	-47489	unterer Punkt der Stütze
1310	12	-315	-454	-2334	-1,78E+03	-618	-654	oberer Punkt der Stütze

Abbildung 5.22: Zusammenstellung der Ergebnisse der manuellen Berechnung und der FEM: Die Angaben der KP-Werte sind mit Abbildung 5.20 zu vergleichen. Weitere Elementzuordnungen s. Tabelle 5.7.

Element	zugehöriger Punkt	Beschreibung
1081	21	Verbindungswinkel des Pofils zwischen den Punkten 21-25
1141	24	Verbindungswinkel des Pofils zwischen den Punkten 24-28
2021 und 2071	21	Verbindungswinkel des Pofils zwischen den Punkten 21-24
2160 und 2210	24	Verbindungswinkel des Pofils zwischen den Punkten 21-24
450	12	Mitte des Querträgers zwischen den Punkten 2-7
730	15	Mitte des Querträgers zwischen den Punkten 4-9

Tabelle 5.7: Zuordnung der betrachteten Elemente.

5.6.1 Verbindungswinkel

Zur Beurteilung der Belastung der Winkelverbindungen werden die folgenden Grenzwerte des Herstellers herangezogen:

Winkel 5	20x20 Zn	F < 250 N ∧ F x l < 5 Nm
Winkel 5	40x40 Zn	F < 500 N ∧ F x l < 25 Nm
Winkel 6	30x30 Zn	F < 500 N ∧ F x l < 12 Nm
Winkel 6	60x60 Zn	F < 1000 N ∧ F x l < 36 Nm
Winkel 8	40x40 Zn	F < 1000 N ∧ F x l < 50 Nm
Winkel 8	80x80 Zn	F < 2000 N ∧ F x l < 150 Nm
Winkel 8	160x80 Zn	F < 2000 N ∧ F x l < 150 Nm

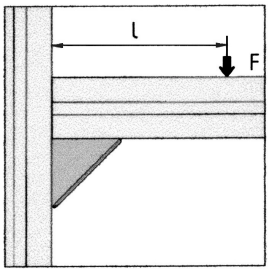


Abbildung 5.23: Herstellerangaben zur maximalen Belastung der Winkelsätze durch vertikale Kräfte und Momente [21]; Jeder Winkelsatz ist auf beide Bedingungen hin zu prüfen. Die eingesetzten Winkelsätze sind rot markiert.

Es mussten jeweils beide in Abbildung 5.23 aufgeführten Bedingungen erfüllt sein. Aus den Ergebnissen der FEM waren die Werte der Momente M_z und der Kräfte F_y von Bedeutung.
Die Ergebnisübersicht (Abbildung 5.22) macht deutlich, dass die Verbindungswinkel nach der manuellen und der FEM-Berechnung nicht überlastet werden. Die Kraft- und Momentenwerte liegen unter den erlaubten Grenzwerten. Die Verbindungswinkel der Längsträger, auf denen der Drehkanal ruht werden am stärksten belastet (KP 1 und 5).

5.6.2 Querträger

Abbildung 5.24 zeigt den Momentenverlauf im Gestell für den Belastungsfall 2 ohne (a)) und mit (b)) Entlastungsstütze (3). Im Fall a) beträgt das maximale Biegemoment im Querträger (1) etwa 458 Nm. Nach der manuellen Berechnung, unter Vorgabe einer Punktlast, ergab sich ein Wert von 718 Nm bei gelenkiger Lagerung (Tabelle 5.3, S. 38). Durch die Stütze wird das Biegemoment in diesem Querträger reduziert, die Belastung im zweiten Querträger (2) bleibt mit etwa 169 Nm, bzw. 170 Nm von der Entlastungsstütze unberührt (b)).

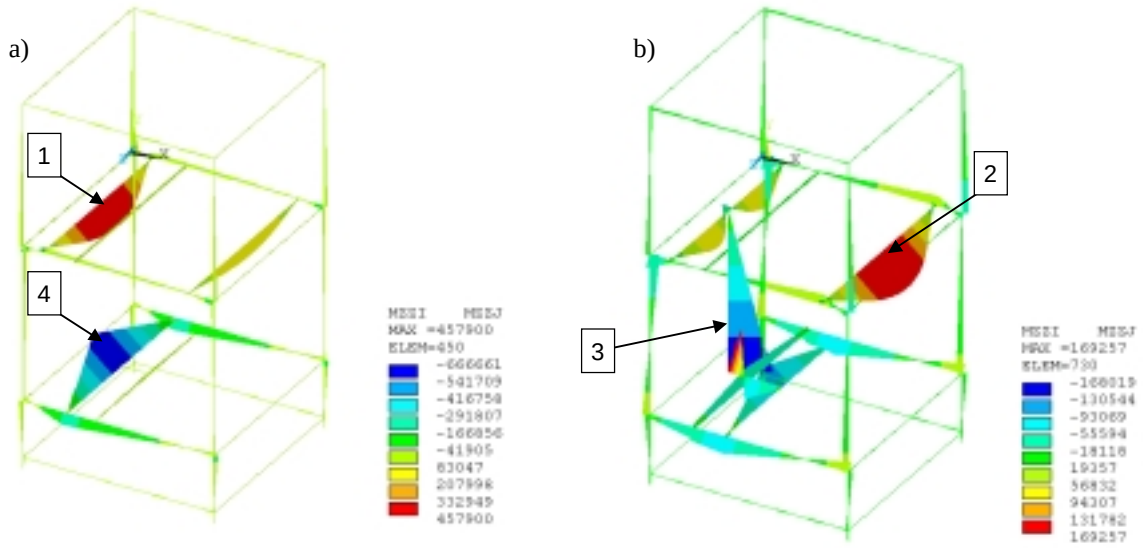


Abbildung 5.24: Vergleich der Momentenverläufe M_z ohne (a) und mit (b)) Entlastungsstütze im Belastungsfall 2.

Das Moment von 667 Nm im unteren Querträger (a) (4)) ist unkritisch, weil dieser Träger einen größeren Querschnitt aufweist.

Die auftretenden Biegespannungen wurden nach folgender Gleichung ermittelt:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W} \qquad (5.13)$$

W Widerstandsmoment [mm^3] (Abbildung 5.2, S. 26)
M_b Biegemoment [Nmm]
σ_b Biegespannung [N/mm^2]

Auf diese Spannung wurde die Streckgrenze des Profilmaterials (vgl. Anhang 20.8) bezogen, um die vorhandene Sicherheit S während der Belastung zu bestimmen (Gleichung (5.14)).

$$\sigma_{zul} = \frac{Rp_{0,2}}{S} \qquad (5.14)$$

S Sicherheit
$Rp_{0,2}$ Streckgrenze (= 195 N/mm^2)

[Nmm] M_b	[N/mm^2] σ_b	[1] Sicherheit	Anmerkung
717925	160	1,2	manuelle Berechnung (Fall 2)

Tabelle 5.8: Biegespannungen im Querträger infolge einer Punktlast Berechnung mit $W = 4{,}5 \cdot 10^3$ cm^3 (Abbildung 5.2), Sicherheit nach Gleichung.(5.14).

Der in Tabelle 5.8 herangezogene Belastungsfall ergab das größte Biegemoment im Querträger.

5.6.3 Entlastungsstütze

Wie aus Abbildung 5.25 zu ersehen ist, nimmt die Entlastungsstütze den größten Anteil der vertikalen Belastung auf.

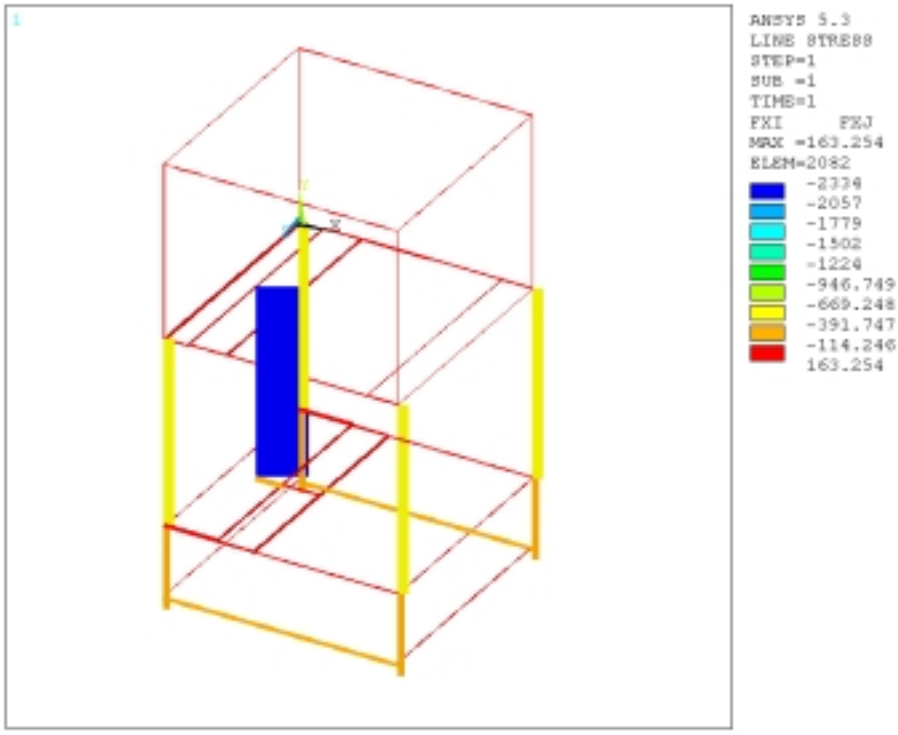


Abbildung 5.25: Verlauf der Kraft F_x in den Profilen.

Für die Beurteilung der Stützenbelastung wurden die Ergebnisse der FEM-Analyse des Belastungsfalls 2 herangezogen. Der Rechengang selbst erfolgte gemäß DIN 4113 T 1 [10] unter Annahme einer planmäßig außermittigen Belastung. Danach war zunächst der allgemeine Spannungsnachweis gemäß Gleichung (5.15) zu führen, bevor der Stabilitäts-nachweis nach Gleichung (5.16) folgen konnte.

$$\frac{F_x}{A} \pm \frac{M_z}{W} \leq \sigma_{zul} \qquad (5.15)$$

F_x Absolutwert der Druckkraft in der Stütze [N]
M_z Absolutwert des Biegemoments in der Stütze [Nmm]
A Querschnittsfläche der Stütze [mm^2]
W Widerstandsmoment [mm^3]
σ_{zul} zulässige Spannung nach [10] [N/mm^2]

$$\omega \cdot \frac{F_x}{A} + 0{,}9 \cdot \frac{M_z}{W} \leq \sigma_{zul} \qquad (5.16)$$

ω Knickzahl nach [10], s. Anhang 20.6
F_x, M_z, A, W, σ_{zul} s. Gleichung (5.15)

Den Berechnungen wurden die nachstehenden Werte zugrundegelegt:

Größe	Belastungsfall 2	Belastungsfall 3
A	6,46 cm^2	6,46 cm^2
W	4,50 cm^3	4,50 cm^3
I	9,00 cm^4	9,00 cm^4
σ_{zul}*	95 N/mm^2	95 N/mm^2
F_x	2334 N	618 N
M_z	$1{,}68 \cdot 10^5$ Nmm	47489 Nmm

Tabelle 5.9: Relevante Größen.
** Bezüglich der zulässigen Druckspannung wurde auf einen Wert aus DIN 4113 T 1 zurückgegriffen, für die Al-Legierung AlMgSi0,5 F22 Lastfall H.*

Die Knickzahl ω wurde in Abhängigkeit des Schlankheitsgrades λ einer Tabelle aus dem Regelwerk [10] entnommen. Der Schlankheitsgrad entspricht dem Quotienten aus der Knicklänge l_k und dem Bezugsradius i:

$$\lambda = \frac{l_k}{i} \qquad (5.17)$$

l_k Knicklänge nach Abbildung 5.26 [mm]
i Bezugradius nach Gleichung (5.18) [mm]

Für den Rechengang wurde der Eulerfall 2 zugrundegelegt, womit l_k der Länge l_{14} (= 765 mm) (Tabelle 5.6) entsprach.

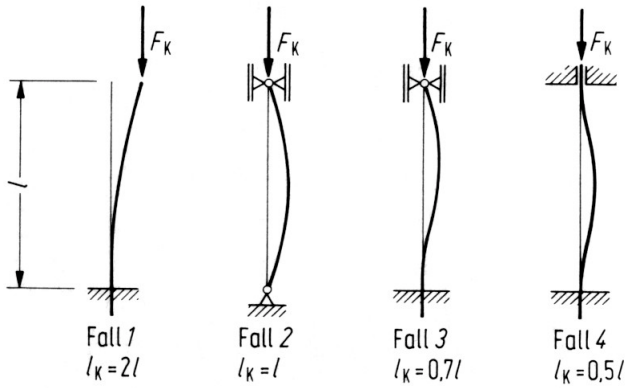


Abbildung 5.26: Unterscheidung der vier Eulerfälle [14].

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \qquad (5.18)$$

I, A s. Tabelle 5.9

Nach [10] darf die Knickzahl durch Interpolation zwischen zwei benachbarten Tabellen ermittelt werden. Es wurden zwei Knickzahlen für die Streckgrenze von 200 N/mm^2 und 160 N/mm^2 bestimmt und anschließend zwischen ihnen auf eine Streckgrenze von 195 N/mm^2 linear interpoliert. Somit ergab sich für einen Schlankheitsgrad von 65 eine Knickzahl von 1,85.

$Rp_{0,2}$	**64**	**66**	**65**	← Schlankheitsgrad
200	1,82	1,94	1,88	
160	1,62	1,66	1,64	
195			**1,85**	

Tabelle 5.10: Interpolation der Knickzahlen:
ω-Werte zu den Schlankheitsgraden von 64 und 66 aus der Knickzahlentabelle [10] (s. Anhang),
zu 65 wurden die Werte linear interpoliert.

Die Anwendung der Gleichungen (5.15) und (5.16) ergab, dass die Stütze auch unter dem Belastungsfall 2 keiner Knickgefahr ausgesetzt ist Tabelle 5.11.

[N] **F_x**	**[Nmm]** **M_z**	**[N/mm^2]** **Spannung nach Gl. (5.15)**	**[N/mm^2]** **Spannung nach Gl. (5.16)**	**[N/mm^2]** **σ_{zul}**
2334	168000	41	40	95

Tabelle 5.11: Ergebnisse der Nachweise.

5.6.4 Ergebnis

- Die FEM-Betrachtung des Gestells ohne Entlastungsstütze (OST) konnte die Ergebnisse der manuellen Berechungen (MB 1 und MB 2) recht gut bestätigten.
- Die Berechnungen machen deutlich, dass die Profilverbindungen aufgrund der Nachgiebigkeiten der angeschlossenen Profile nur annähernd als feste Einspannungen betrachtet werden dürfen.
- Unter Annahme einer theoretischen Punktlast bei der manuellen Berechnung trat keine Überlastung auf. Im Realfall wird die Belastung auf eine Fläche verteilt, womit sie günstiger verteilt wird. D.h., dass die Biegebeanspruchung der Querträger geringer ausfällt, als die manuelle Berechnung angibt.
- Bis auf das Biegemoment an der Stelle D (vgl. Abbildung 5.9) beim Belastungsfall 2 liegen die Kräfte und Momente aus der FEM-Betrachtung des Gestells ohne Entlastungsstütze jeweils zwischen denen der beiden Annahmen für die manuelle Berechnung. Dies ist eine Bestätigung dafür, dass die beiden eingangs aufgestellten Annahmen je einen unteren und oberen Grenzfalls darstellen.
- Die Verbindungswinkel werden nicht überlastet.
- Auf die Entlastungsstütze kann nicht verzichtet werden. Zwar bleiben die Schnittgrößen ohne sie unterhalb der Grenzwerte, aber die zu erwartenden Verformungen im Bereich des Antriebs würden dessen Funktion gefährden.

6 Positioniersteuerung

Zur Realisierung des Drehkanalantriebs wurde ein Antriebssystem der Firma SIG Positec Bergerlahr vorgesehen, bestehend aus einer Positioniersteuerung und einem Schrittmotor.
Zur Anwendung kommt die Positioniersteuerung TLC 511-F (Abbildung 6.1) und der Schrittmotor VRDM 397. Die Positioniersteuerung enthält einen Steuerungs- und einen Leistungsteil (auch Endstufe). Aus dem Steuerungsteil werden Positioniersignale an den Leistungsteil übergeben, der entsprechende Ströme für die Ansteuerung des Schrittmotors generiert.
Die Positioniersteuerung bietet die Möglichkeit einer Ansteuerung über einen PC. Dazu verfügt sie über eine RS232-Schnittstelle (2) und ein RS485-C-Modul (5).

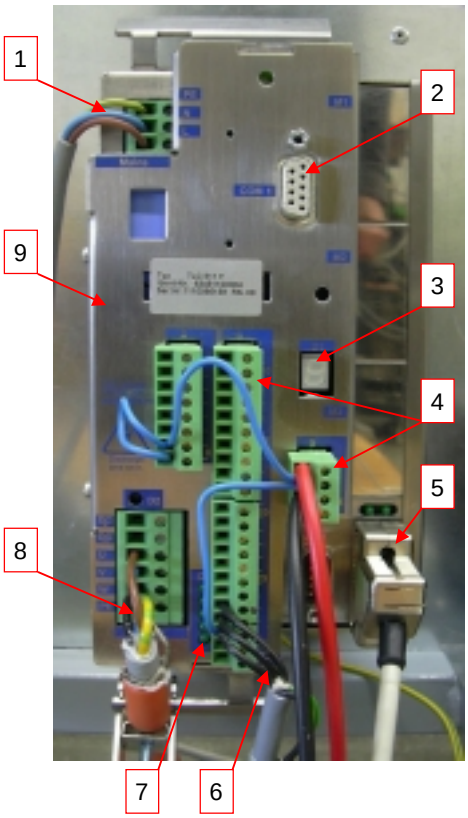


Abbildung 6.1: Bild der eingesetzten Positioniersteuerung (9):
1: Netzanschluss (230 V), 2: RS232-Schnittstelle, 3: Zustandsanzeige (7-Segmentanzeige), 4: Signal-Schnittstellen, 5: Anschluss an der RS485-C-Schnittstelle, 6: Leitungen zu den Endschaltern am Drehkanal, 7: LEDs zur Zustandsanzeige der nebenliegenden Anschlüsse, 8: Motoranschluss.

6.1 Verschaltung der Positioniersteuerung

Die Positioniersteuerung wurde mit der minimal möglichen Signal-Schnittstellenbelegung versehen [36]. Die 24 V-Versorgungsspannung wird, wie in (Abbildung 6.2) gezeigt, an den Pinnen 31 und 33 angeschlossen. Damit die Positioniersteuerung arbeitet, müssen die Pinne 26, 27 und 28 ebenfalls mit der vorgenannten Spannungsversorgung verbunden sein. Eine Unterbrechung derer Versorgung endet mit einer Einstellung des Fahrbetriebes. Über die Pinne 26 und 27 kann über daran angeschlossene Taster, die bei Betätigung den Spannungskreis öffnen, der Drehbereich des Drehkanals begrenzt werden. Ein Taster (T2) an Pin 26 begrenzt die Bewegung in positiver, ein Taster (T1) an Pin 27 in negativer Motordrehrichtung (Abbildung 6.2 und Abbildung 6.3). In der vorliegenden Konfiguration dient der Taster T1 an Pin 27 zum Markieren der Startposition des Drehkanals. Damit beim Drehkanalbetrieb ein unkontrolliertes Aufwickeln des Mikrofonkabels vermieden wird, schränkt der Taster T2 an Pin 26 die Drehkanaldrehung ein. Diese Einschränkung greift jedoch erst, wenn der programmierte Stopp nach einer Umdrehung nicht erfolgt.

Für die Verkabelung zwischen der Positioniersteuerung und den Endschaltern und –tastern wurde ein mehradriges Kabel verwendet, dessen Adern nummeriert sind. In Abbildung 6.2 sind die Adernummern mit roten Ziffern angegeben.

Die Schaltelemente werden über einen Auslöser (3) (Abbildung 6.3), der am Rohr des Drehkanals befestigt ist, betätigt. Zu Beginn der ersten Messfahrt dreht der Drehkanal in positiver Richtung und muss vor Beendigung der ersten Umdrehung die Taster T2 und T1 passieren, ohne dass der Fahrbetrieb beendet wird. Erst nach dieser Umdrehung darf ein Passieren des Tasters T2 die Fahrt abbrechen. In entgegengesetzter Richtung gilt Analoges. Diese Funktion wird durch die parallel zu den Tastern geschalteten Schalter (S1 und S2) gewährleistet, durch die die Taster aktiviert und deaktiviert werden (vgl. Abbildung 6.4).

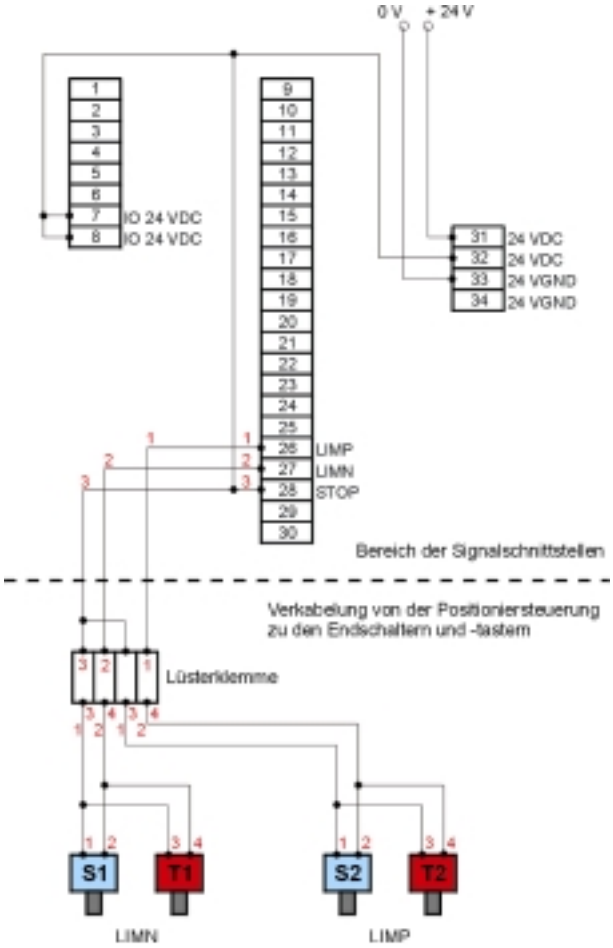


Abbildung 6.2: Verdrahtung der Signalschnittstellen und der Endschalter (S1, S2) und –taster (T1, T2): Die roten Ziffern entsprechen den Adernummern der Kabel.

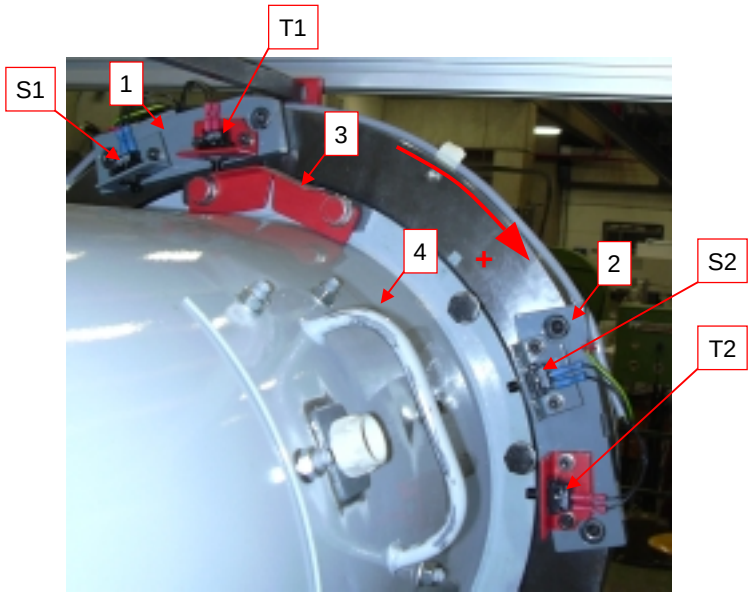
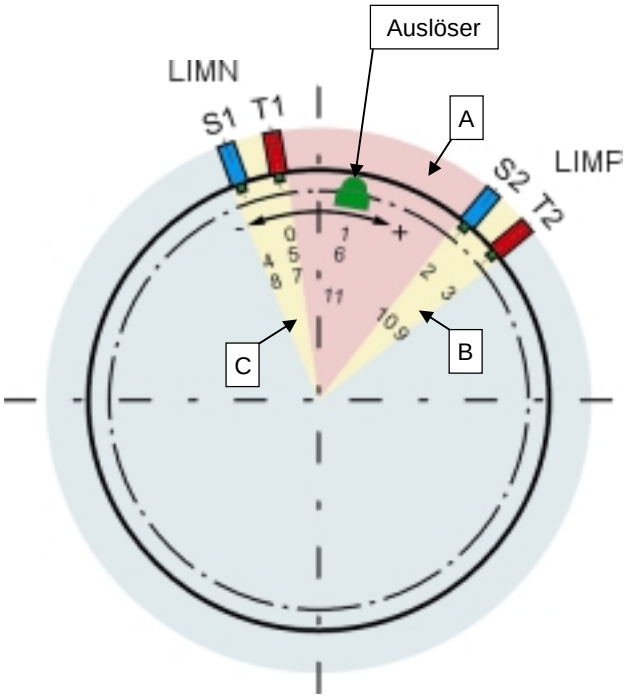


Abbildung 6.3: Blick auf die Verschaltung am Drehkanal:
1: Schalter und Taster zu Pin 27 (LIMN), 2: Schalter und Taster zu Pin 26 (LIMP)
3: Am Drehkanal (4) befestigter Auslöser:
Der rote Pfeil markiert die positive Drehrichtung.

6.2 Ausgangsbedingung der Schaltung

Um die oben beschriebene Funktionsweise zu erfüllen, müssen die Schalter einen bestimmten Ausgangszustand einnehmen. Wird davon ausgegangen, dass sich der Auslöser zu Beginn der Drehkanalaktivierung in dem Segment A (vgl. Abbildung 6.4), zwischen den Schaltbereichen LIMN und LIMP, befindet, dann müssen die Schalter S1 und S2 geöffnet sein. Dies ist durch eine manuelle Betätigung der Taster zu prüfen. Wird der Taster T1 gedrückt, muss die LED neben dem Anschluss 27 erlischen, bei Betätigung von Taster T2 muss entsprechendes mit der LED neben der Klemme 26 geschehen (vgl. dazu Abbildung 6.1). Für diesen Test ist lediglich die 24 V-Versorgungsspannung der Steuerung einzuschalten.



Position	S1	T1	S2	T2	Bemerkung
Anfang	0	1	0	1	Vor der DK-Aktivierung befindet sich der Auslöser im Segment A.
0	0	0	0	1	Referenzpunkt angefahren
1	0	1	0	1	Startposition für die Messfahrten
2	0	1	1	1	Schalter S2 überbrückt Taster T2.
3	0	1	1	0	Der Auslöser kann Taster T2 passieren.
4	1	1	1	1	Schalter S1 überbrückt Taster T1.
5	1	0	1	1	Der Auslöser kann Taster T1 passieren.
6	1	1	1	1	Ende der Messfahrt in positiver Richtung
7	1	0	1	1	Der Auslöser passiert Taster T1.
8	0	1	1	1	Die Überbrückung durch Schalter S1 wird ausgehoben.
9	0	1	1	0	Der Auslöser passiert Taster T2.
10	0	1	0	1	Die Überbrückung durch Schalter S2 wird ausgehoben.
11	0	1	0	1	Ende der Messfahrt in negativer Drehrichtung

Abbildung 6.4: Darstellung der Schaltpositionen des Auslösers und die zugehörenden Schalterzustände: Links: Schema der Fahrbereiche am Drehkanal aus der Blickrichtung nach Abbildung 6.3, A: Segment der Ausgangssituation, B: Schaltbereich LIMP (Überdrehschutz), C: Schaltbereich LIMN (Referenzzierung) Rechts: Schalter- und Tasterzustände zu den links bezifferten Positionen: 1 = geschlossen, 0 = geöffnet.

Die Stellen (1) bis (11) in Abbildung 6.4 stellen die relevanten Positionen des Auslösers auf seinem Weg vom Zeitpunkt der Drehkanalaktivierung (im Bereich (A)), über die Referenzzierung ((0), (1)) und der ersten beiden Messfahrten dar, wonach er sich wieder an der Startposition (11) einfindet.

6.3 Voreinstellungen der Positioniersteuerung

Bevor die Positioniersteuerung das erste Mal mit dem entwickelten LabVIEW-Programm angesprochen werden konnte, waren in ihrem EEPROM-Speicher bestimmte Parameterwerte einzustellen. Dieser Vorgang wurde mit dem Bedienprogramm TL CT, das mit der Positioniersteuerung mitgeliefert wurde, durchgeführt. Die genaue Vorgehensweise ist in der Programmdokumentation [35] beschrieben.
In den Parametereinstellungen waren Eingaben in den Menüs „Settings“, „Motion“ und „M4“ erforderlich.

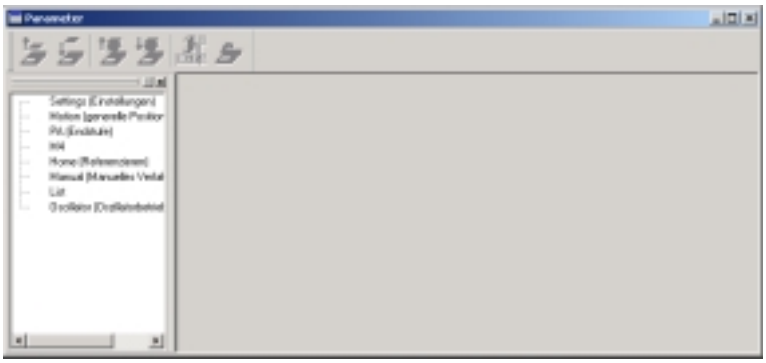


Abbildung 6.5: Menüfenster für die Parametereinstellungen.

Als erstes war der Parameter „IO_mode“ im Menü „Settings“ auf den Wert „I/O frei verfügbar“ einzustellen. Solange diese Eingabe nicht erfolgt war, wurde beispielsweise die Umstellung der Baudrate im Menüpunkt „M4“ nicht im EEPROM gespeichert.

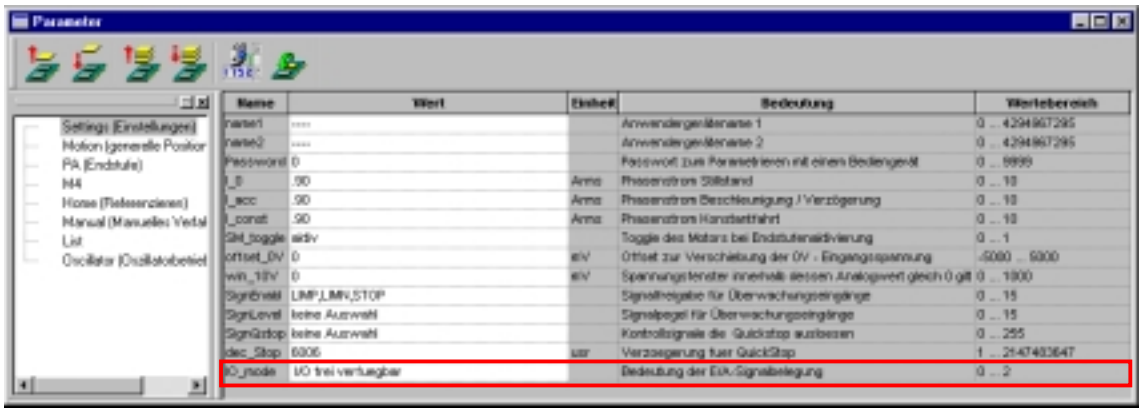


Abbildung 6.6: Einstellung des Parameters „IO_mode“ im Menü „Settings“.

Im nächsten Schritt wurde dem Parameter „pNormDen“ in der Parametergruppe „Motion“ der Wert „18000“ zugewiesen. Damit wurden 18000 Inkremente für eine Schrittmotorumdrehung

vorgegebenen. Diese Eingabe war für die Berechnungen der Drehkanalbewegungen im Steuerprogramm relevant.

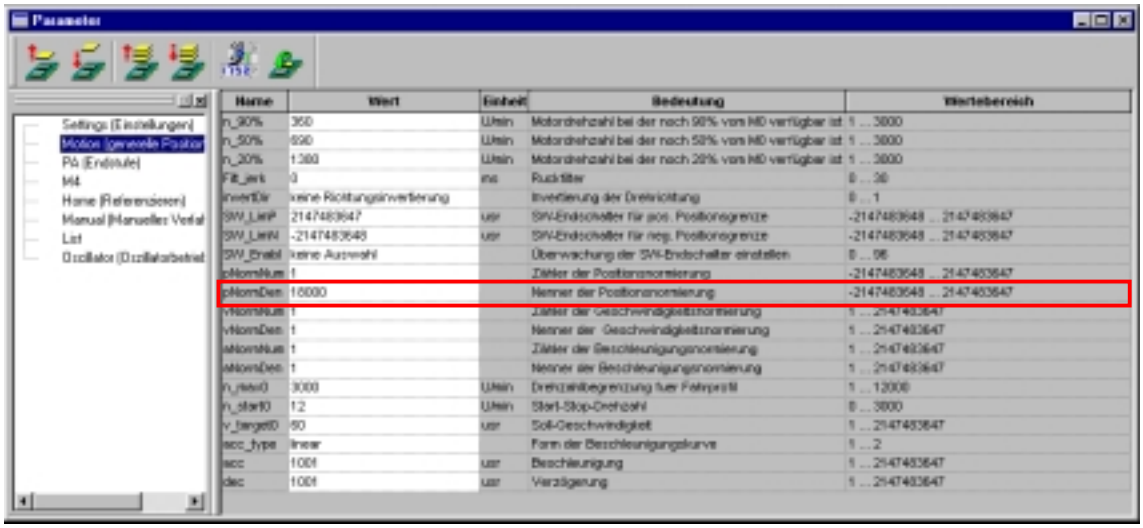


Abbildung 6.7: Vorgabe des Wertes des Parameters „dNormDen“ im Menü „Motion“.

Die letzte erforderliche Einstellung betraf die Baudrate und die Geräteadresse im Menü „M4“. Die Bausrate wurde auf den Wert „9600“ und die Geräteadresse auf den Wert „1“ gesetzt.

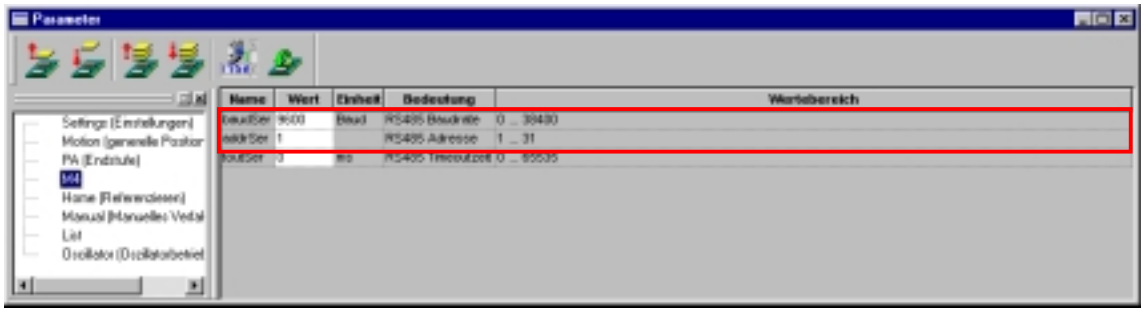


Abbildung 6.8: Eingabe der Baudrate und der Geräteadresse.

Die Einstellungen der übrigen Untermenüs mussten nicht geändert werden.

Die Parameterwerte der Konfiguration, mit der im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit gearbeitet wurde, ist aus der Gerätedatendatei TLC_Konfiguration_040403.TLX zu ersehen. Diese lässt sich aus dem TL CT-Bedienprogramm heraus laden.

7 Kommunikation mit der Twin Line Positioniersteuerung

Die verwendete Positioniersteuerung TLC 511-F verfügt über eine RS232-Schnittstelle und ist zudem mit einem RS485-C-Modul ausgestattet, das eine Kommunikation des Gerätes in einem Feldbus zulässt.
Nach [34] kann die Steuerung über zwei verschiedene Zugriffskanäle angesprochen werden. Es handelt sich dabei einmal um einen lokalen und zum anderen um einen ferngesteuerten Zugriff. Der lokale Zugriff sieht eine direkte Kabelverbindung zwischen der Steuerung und dem PC vor. Beide Geräte werden hierfür über ein Standardverbindungskabel (1:1-Übersetzung) mit ihren seriellen Schnittstellen (RS232) verbunden. Der ferngesteuerte Zugriff ist nicht auf eine direkte Verbindung angewiesen. Zwischen den beiden Geräten kann sich ein Netzwerk mit mehreren Kommunikationspartnern befinden. In diesem Fall gehen die Befehle von einem „Mastergerät“ an die angeschlossenen „Slavegeräte“. Die Verbindungen werden zudem in einem Feldbus realisiert, wofür die RS485-Schnittstelle der Steuerung verwendet wird. Der ferngesteuerte Zugriff kann auch mit einem PC als „Mastergerät“ und einer Positioniersteuerung als „Slavegerät“ realisiert werden. Dazu ist die serielle Schnittstelle des PCs über einen Schnittstellenumsetzer (s. Anhang 20.9) mit der RS485-Schnittstelle der Steuerung zu verbinden.
Der vorgesehene Betrieb der Steuerung ist der in einem Feldbus, daher ist sie von Werk aus mit der RS485-Schnittstelle ausgestattet. Der lokale Zugriff mit dem PC dient dabei als Wartungsmöglichkeit. In der aktuellen Anwendung zur Steuerung des Drehkanals ist kein Feldbus vorgesehen und die Kommunikation findet aus nächster Nähe statt. Es steht daher frei die Kommunikation über den lokalen oder den ferngesteuerten Zugriff aufzubauen. Beide Varianten wurden ausprobiert.

7.1 Betrieb der Positioniersteuerung mit dem Bedienprogramm Twin Line Control Tool (TL CT)

Dies ist die einfachste Weise, um die Positioniersteuerung mit einem PC anzusprechen. Die Kommunikation erfolgt im lokalen Zugriff. Über das mitgelieferte Bedienprogramm TL CT kann ein Funktionstest ohne weitere Programmierarbeit durchgeführt werden. Seine Anwendung eignet sich überdies insbesondere zum Einstellen der Parameter der Positioniersteuerung

(vgl. Abschnitt 6.3). Eine detaillierte Beschreibung des Bedienprogramms ist [35] zu entnehmen.

7.2 Kommunikationsprotokoll

Die nachfolgenden Erläuterungen zur Kommunikation mit der Positioniersteuerung wurden aus [34] und [36] zusammengestellt, um einen Überblick zu verschaffen.
Die Struktur der Kommunikation über den Feldbus mit dem RS485-C-Modul lässt sich auch auf eine Kommunikation über die RS232-Schnittstelle übertragen.

7.2.1 Datenstruktur

Die Sende- und Empfangsdaten werden für die Kommunikation in einem acht Byte großen Datenrahmen untergebracht (Abbildung 7.1).

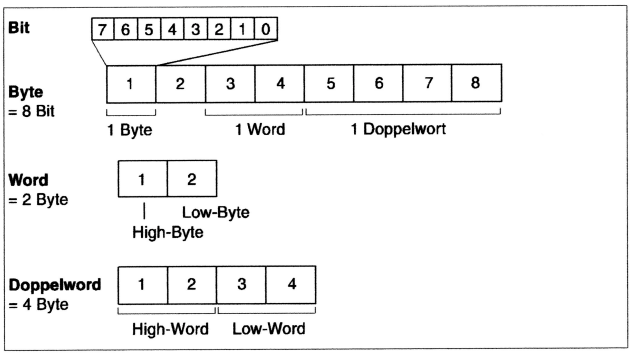


Abbildung 7.1: Datenstruktur [34].

Die Werte der Datenstrukturbestandteile (Byte, Word, Doppelword) werden in die hexadezimale Schreibweise überführt, die dann als ASCII-Zeichenkette übertragen wird. Die Zeichenkette muss durch das Abschlusszeichen <CR> („carriage return“) beendet werden. Um den maximalen Wert von pro Byte übertragen zu können, sind pro Byte 2 ASCII-Zeichen bereitzustellen (Abbildung 7.2). Der maximale Wert pro Byte beträgt 255, was einem hexadezimalen Code von „FF“ entspricht.

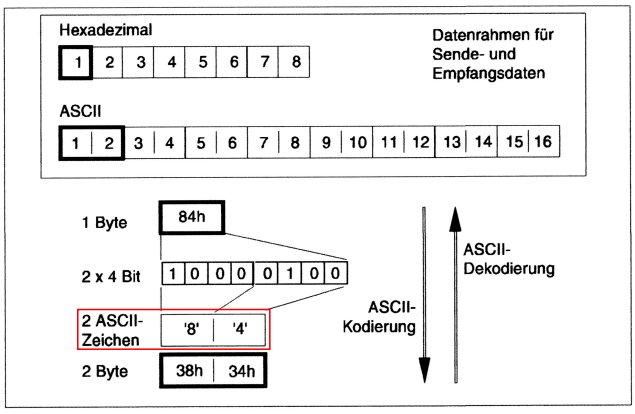


Abbildung 7.2: ASCII-Codierung des Datenrahmens nach [34]:
Der rote Rahmen markiert den ASCII-Code des ersten Bytes, wenn in ihm der hexadezimale Wert "84" steht. In dezimaler Schreibweise entspricht dies dem Wert „132".

Vom PC werden Sendedaten an die Steuerung übertragen, diese wiederum antwortet durch die Sendung von Empfangsdaten. Beide Datenarten weisen eine feste Struktur auf.

7.2.1.1 Sendedaten

Über die Sendedaten werden Steuer- und Aktionskommandos an die Positioniersteuerung übermittelt.

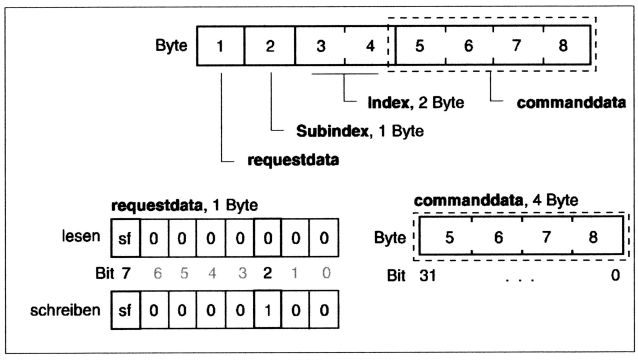


Abbildung 7.3: Sendedatenrahmen [34].

Steuerkommandos werden von der Positioniersteuerung sofort ausgeführt und enden mit der Sendung der Empfangsdaten, zu diesen gehören beispielsweise Befehle zum Ändern von Parametern. Mit Aktionskommandos werden Fahraufträge übermittelt.
Nach Abbildung 7.3 kann der Sendedatenrahmen in vier Bereiche gegliedert werden (Tabelle 7.1).

Bereich	Byte(s)	Name	Information
1	1	requestdata	Lesen od. Schreiben, sendflag
2	2	Subindex	Subindex des Parameters
3	3, 4	Index	Index des Parameters
4	5, 6, 7, 8	commanddata	Werte

Tabelle 7.1 : Aufteilung des Sendedatenrahmens in Bereiche.

Bereich 1: Der erste Bereich enthält nur ein Byte, gemäß Abbildung 7.3. In ihm sind die Bits 2 und 7 maßgebend. Über das Bit 2 wird angegeben, ob ein Wert gelesen oder geschrieben werden soll.

Bit	Wert	Wirkung
2	0	Der angeforderte Wert wird gelesen.
2	1	Der übermittelte Wert wird geschrieben.

Tabelle 7.2: Zustandsbedeutung von Bit 2 im ersten Byte der Sendedaten nach [34]: Das Bit 2 trägt keinen spezifischen Namen.

Das Bit 7 (Name: „sf“) kennzeichnet durch seine Umschaltung zwischen „0“ und „1“, ob ein neues Kommando, bzw. neuer Befehl vorliegt (vgl. Abschnitt 7.2.2).

Bereich 2,3: Der zweite und dritte Bereich sind zusammen zu betrachten. Die Kommandos für die Positioniersteuerung sind nach [34] als Parameter formuliert. Jedem Parameter ist ein Index („Idx“) und ein Subindex („Sidx“) zugewiesen. Die Indizes sind [36] zu entnehmen und in den Sendedatenrahmen aufzunehmen. Zu beachten ist, dass bei der formellen Angabe der Indizes der Index vor dem Subindex steht, wobei beide durch ein „:“ getrennt sind. Im Datenrahmen wird die Reihenfolge dann umgedreht, Byte 2 enthält den Subindex und die Bytes 3 und 4 enthalten den Index des Parameters.

Bereich 4: Im vierten Bereich (Byte 5 bis 8) werden die Werte untergebracht, die übermittelt werden sollen, wie z.B. Geschwindigkeitswerte, Positionsangaben oder Inkrementangaben. Wird ein Wert vom Datentyp INT 16 oder UINT 16 übergeben, so wird er nur in den Bytes 7 und 8 abgelegt. Die Bytes 5 und 6 tragen dann den Wert 0.

7.2.1.2 Empfangsdaten

Neben den Antworten auf ein Kommando enthalten die Empfangsdaten auch Informationen über den Betriebszustand. Auch hier lassen sich, wie bei den Sendedaten, vier Bereiche einteilen (Abbildung 7.4).

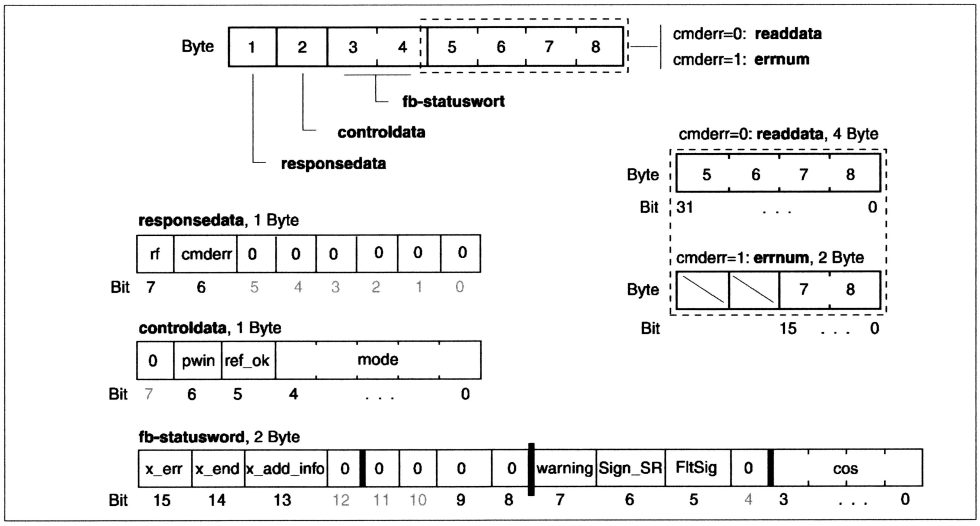


Abbildung 7.4: Empfangsdatenrahmen [34].

Bereich	Byte(s)	Name	Information
1	1	responsedata	Fehler bei der Ausführung, „receiveflag“ („rf“)
2	2	controldata	Betriebsart, Achsdaten
3	3, 4	fb-statusword	Betriebszustand
4	5, 6, 7, 8	readdata / errnum	angeforderte Daten / Fehlernummer

Tabelle 7.3: Kurzinformation über die vier Bereiche in den Empfangsdaten.

Bereich 1: Byte 1 informiert über Bit 6 (Name: „cmderr“) darüber, ob das Kommando fehlerfrei ausgeführt wurde. Tritt ein Fehler auf, dann wird die zugehörige Fehlernummer in den Bytes 7 und 8 (Name: „errnum“) angegeben. Die Fehlercodes sind [36] zu entnehmen.

Bit	Name	Wert	Wirkung
6	cmderr	0	Kommando fehlerfrei ausgeführt
6		1	Fehler bei der Kommandobearbeitung

Tabelle 7.4: Zustände des „cmderr“-Bits (Bit 6 im ersten Byte der Empfangsdaten) nach [34].

Bit 7 (Name: „rf“) dient der Empfangsquittierung und wird zusammen mit dem Bit 7 des ersten Bytes der Sendedaten, dem „sf“-Bit, verarbeitet (vgl. Abschnitt 7.2.2).

Bereich 2: Das zweite Byte („controldata“) informiert anhand der Bits 0 bis 4 über die aktuelle Betriebsart (Tabelle 7.5) und mit dem Bit 5 über die Achsdaten (Tabelle 7.6).

Bit	Name	Wert	Betriebsart
0..4	mode	00001	Manuellfahrt
0..4		00010	Referenzzierung
0..4		00011	PTP-Positionierung
0..4		00100	Geschwindigkeitsbetrieb
0..4		00101	Elektronisches Getriebe

Tabelle 7.5: Bitcodierung der Information über die Betriebsart in den Bits 0 bis 4 im zweiten Byte der Empfangsdaten nach [34]:
Die 5 Bits werden unter dem Namen „mode“ zusammengefasst.

Bit	Name	Wert	Bedeutung
5	ref_ok	0	Kein Referenzpunkt festgelegt
5		1	Referenzpunkt festgelegt

Tabelle 7.6: Kodierung und Bedeutung von Bit 5 des zweiten Bytes der Empfangsdaten, nach [34]:
Das Bit 5 trägt den Namen „ref_ok“ .

Bereich 3: Der dritte Bereich (Byte 3 und 4) informiert über den Betriebszustand der Positioniersteuerung. Von den 16 Bits enthalten die ersten 4 (Bits 0 bis 3) bitcodiert die Information über den aktuellen Betriebszustand. Dieser binäre Code entspricht der 7-Segmentanzeige auf der Positioniersteuerung (s. Tabelle 7.7).

Bit	Wert	Betriebszustand	Bedeutung
0..3	0001	1 – Start	Initialisierung der Geräteelektronik
0..3	0010	2 – Not ready to switch on	Endstufe ist nicht einschaltbereit.
0..3	0011	3 – Switch on disabled	Einschalten der Endstufe ist gesperrt.
0..3	0100	4 – Ready to switch on	Endstufe ist einschaltbereit.
0..3	0101	5 – Switched on	Endstufe eingeschaltet.
0..3	0110	6 – Operation enable	Gerät arbeitet in der eingestellten Betriebsart.
0..3	0111	7 – Quick Stop active	Quick-Stop wird ausgeführt.
0..3	1000	8 – Fault reaction	Fehlerreaktion aktiviert
0..3	1001	9 – Fault	Fehleranzeige

Tabelle 7.7: Bitcodierung der Betriebszustände nach [34]:. Die Ziffern in der Spalte Betriebszustand entsprechen der Abbildung auf der 7-Segmentanzeige. Die Bits 0 bis 3 werden mit dem Namen „cos“ überschrieben.

Das Bit 5 enthält das interne und Bit 6 das externe Überwachungssignal über das ein aufgetretener Fehler erkannt wird. Im Bit 7 werden Warnmeldungen signalisiert. Bei einem Fehler oder einer Warnung wechseln diese Bits ihren Zustand von „0“ auf „1“. Die jeweiligen Ursachen sind dann über verschiedene Parameter auszulesen (vgl. [34]). Die Bits 13, 14 und 15 informieren betriebsartspezifisch über den Bearbeitungszustand.

Bit	Name	Wert	Bedeutung
14	x_end	0	Bearbeitung läuft
14		1	Bearbeitung beendet, Motor steht
15	x_err	0	Fehlerfreier Betrieb
15		1	Fehler aufgetreten

Tabelle 7.8: Zustände und deren Bedeutung der Bits 14 und 15 der Bytes 3 und 4 nach [34].

Das Bit 13 trägt nur für die Betriebsarten „PTP-Positionierung“ und „Geschwindigkeitsbetrieb“ einen Wert.

7.2.2 „sf“- und „rf“-Bit

Mit der Geräteadressierung werden die Bits „sf“ und „rf“ auf einen „0“-Pegel gesetzt. Bei Übermittlung des Sendedatenrahmens vergleicht die Positioniersteuerung den Wert des eingehenden „sf“-Bits mit dem aktuellen Wert des „rf“-Bits (vgl. Abbildung 7.5).

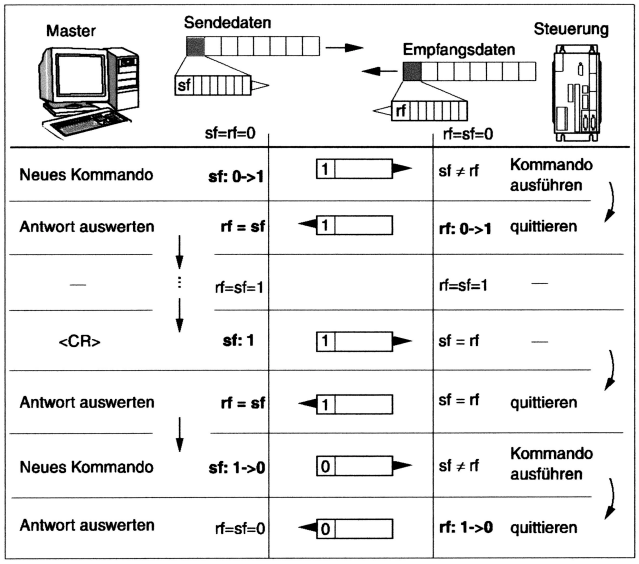


Abbildung 7.5: Darstellung des Datenaustauschs zwischen Master- und Slavegerät in einem Feldbus [34].

Für ein neues Kommando muss das „sf“-Bit im Vergleich zum vorhergehenden Zustand umgeschaltet werden. Steht der Zustand, wie in Abbildung 7.5, zu Beginn bei „0“, muss für das erste Kommando eine Umschaltung auf den Wert „1“ erfolgen. Bei dem Vergleich des „sf“-Wertes mit dem „rf“-Wert erkennt die Steuerung das neue Kommando daran, dass beide Werte nicht identisch sind. Im Falle einer Übereinstimmung beider Werte, gilt das Kommando bei der Steuerung als bereits bearbeitet.

7.2.3 Datenrahmenübersicht

Die beiden Datenrahmen und deren internen Bits sollen noch einmal in einer Übersicht einander gegenübergestellt werden.

Byte	1	2	3	4	5	6	7	8
Sendedaten	**request-data**	Subindex	Index		commanddata			
Empfangsdaten	**response-data**	**controll-data**	**fb-statusword**		readdata (cmderr = 0) / errnum (cmderr = 1)			

Tabelle 7.9: Gegenüberstellung der Datenrahmen der Sende- und Empfangsdaten. Fettgedruckt sind die Bytes, die in Tabelle 7.10 aufgeschlüsselt werden.

Bit	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
requestdata	X	X	X	X	X	X	X	X	sf	0	0	0	0	0	0	0
responsedata	X	X	X	X	X	X	X	X	rf	cmderr	0	0	0	0	0	0
controldata	X	X	X	X	X	X	X	X	0	pwin	ref_ok	mode				
fb-statusword	x_err	x_end	x_add_info	0	0	0	0	0	warning	Sign_SR	FltSig	0	cos			

Tabelle 7.10: Lage und Namen der einzelnen Bits
X bedeuten „keine Belegung“, weil nur 1 Byte benötigt wird.

7.2.4 Zusammenstellung der Sendedaten an einem Beispiel

Anhand eines Beispiels sollen die erforderlichen Schritte zur Erstellung der Sendedaten dargestellt werden. In diesem Beispiel soll die Kommandozeichenkette zum Einschalten der Endstufe erstellt werden. Aus der Tabelle der Parametergruppe „Commands“ (Abbildung 7.6) aus [36] sind die erforderlichen Informationen zu entnehmen.

12.2.2 Parametergruppe Commands

Parameter Name	Idx:Sidx	TL-HMI	Bedeutung und Einheit [ ]	Wertebereich	Default-Wert	R/W rem.	Infos Seite
eeprSave	11:6	3.9 4.9 6.9	Parameterwerte in EEPROM-Speicher sichern 1: Sicherung des Bereichs durchführen	UINT16 Zu sichernde Bereiche: Bit0: Parameter Bit1: Satzdaten Bit2: Listendaten Liste1 Bit3: Listendaten Liste2 Bit4: Anwenderdef. Daten	–	R/W –	-
stateSave	11:7	–	Bearbeitungszustand von "Commands.eeprSave"	UINT16 0: Speichern aktiv 1: Speichern beendet	–	R/– –	-
default	11:8	–	Parameter mit Defaultwerten initialisieren, Werkseinstellung	UINT16 1: Initialisierung starten	–	R/W –	-
stateDef	11:9	–	Bearbeitungszustand Param. "Commands.default"	UINT16 0: Initialisierung aktiv 1: Initialisierung beendet	–	R/– –	-
driveCtrl	28:1	–	Steuerwort für Zustandswechsel, Voreinstellung Bit0..3='0', Schreibzugriff löst automatisch Flankenwechsel 0->1 aus.	UINT16 Bit0: Disable Endstufe Bit1: Enable Endstufe Bit2: Stop (Quick-Stop) Bit3: FaultReset Bit4..15: nicht belegt	0	R/W –	8-2

Abbildung 7.6: Auszug aus der Parameterübersicht nach [36].

Größe	Inhalt
Index	28
Subindex	1
Wert	Zum Einschalten ist Bit 1 (auf 1) zu setzen. Der Wert wird im Datenformat „UINT16“ übergeben und ist demnach in den Bytes 7 und 8 unterzubringen.

Tabelle 7.11: Erforderliche Informationen für die Erstellung des Sendekommandos aus der Parametertabelle (Abbildung 7.6).

Es soll ein Zustand verändert werden, d.h. der Wert ist zu schreiben. Zudem wird davon ausgegangen, dass es der erste Befehl nach dem Adressieren sein soll. Die Bits „sf“ und „rf“ enthalten demnach die „0“-Werte. Damit das neue Kommando erkannt wird, ist das „sf“-Bit auf

den Wert „1“ umzuschalten. Aus den obigen Informationen lassen sich nun die einzelnen Bytes erstellen. Es werden hierbei zunächst die Dezimalwerte der Bytes aufgeführt:

requestdata:

7	6	5	4	3	2	1	0	Bit
1	0	0	0	0	1	0	0	**Wert = 132**

Tabelle 7.12: Bit-Werte von Byte 1.

Subindex: 1

Index. 28

commanddata: Der Datentyp des zu übergebenen Wertes ist mit UINT 16 angegeben (Abbildung 7.6), d.h., dass der Wert nur in den Bytes 7 und 8 abgelegt werden muss. Die Bytes 5 und 6 tragen die Werte 0 (vgl. Abschnitt 7.2.1.1).

Byte 7								Byte 8								
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	Bit
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	**Wert = 2**

Tabelle 7.13: Bit-Werte der Bytes 7 und 8 zum Einschalten der Endstufe.

Es empfiehlt sich, den Datenrahmen zunächst in dezimaler Form zu schreiben. Vor der Übertragung muss er jedoch in die hexadezimale Schreibweise überführt werden. Dabei muss die Gesamtlänge von 16 Zeichen bewahrt werden. Dies wird durch Auffüllen nicht belegter Stellen mit Nullen erreicht (s. Tabelle 7.14).

Byte	1	2	3	4	5	6	7	8
Sendedaten	request-data	Subindex	Index		commanddata			
Dezimalwert	132	1	28		2			
Hexadezimalwert	84	01	00 1C		00 00 00 02			

Tabelle 7.14: Darstellung der Kommandodaten:
Zeile 3 zeigt die Dezimalwerte wie sie nach den obigen Angaben ermittelt wurden. In Zeile 4 sind die zugehörenden Hexadezimalwerte abgebildet, bei denen restliche Stellen mit Nullen aufgefüllt wurden, damit die notwendige Länge von 16 Zeichen erreicht wird.

Zur Abschlusskennung ist das Steuerzeichen für den Wagenrücklauf („carriage return“) an das Ende der Zeichenkette anzuhängen. Damit lautet das endgültige Kommando zum Einschalten der Endstufe:

8401001C00000002<CR>

8 Anwendung der Mess- und Steuerprogramme und der Analyseprogramme

Die akustische Messung an einem Ventilators mittels Drehkanal besteht aus der Datenakquirierung und der Datennachbereitung. Für die Akquirierung sind im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit zwei LabVIEW-Programme entwickelt worden:

- DK_Messfahrt_Aufnahme_XXXXXX.vi,
- DK_Stillstand_Aufnahme_XXXXXX.vi.

Das Programm DK_Messfahrt_Aufnahme_XXXXXX.vi zeichnet die akustischen Daten während einer Drehkanalumdrehung auf, dabei übernimmt es auch die Drehkanalsteuerung. Das Programm DK_Stillstand_Aufnahme_XXXXXX.vi dient lediglich der Aufnahme akustischer Signale, ohne den Drehkanal zu steuern. In beiden Programmen ist ein Modul zur Aufnahme der Kalibriersignale enthalten, das optional gestartet werden kann. Die gewonnen Daten werden im WAV-Format lokal auf der Festplatte abgespeichert.
Die Nachbereitung erfolgt anhand der aufgezeichneten Rohdaten unter MATLAB mit drei Programmen:

- Kalibrierfaktor_Kanal_bereich.m
- Wav_Analyse_Programm_auto.m
- Mat_lesen_darstellen.m

Das Programm Kalibrierfaktor_Kanal_bereich.m berechnet aus den abgelegten Kalibriersignalen die Kalibrierfaktoren und speichert diese in einer Textdatei ab. Auf diese Textdatei greift das Programm Wav_Analyse_Programm_auto.m zu und wendet die Kalibrierfaktoren bei der Analyse der Messdateien an. Die Analyseergebnisse werden anschließend in Ergebnisdateien (im MAT-Format) abgespeichert. Da das Programm einen automatisierten Dateizugriff durchführt sind die zu analysierenden Dateien nach einem festen Schema zu benennen. Mit Hilfe des Programms Mat_lesen_darstellen.m können die Ergebnisse der Analyse grafisch dargestellt werden. Das Programm greift dazu auf die zuvor erstellten Ergebnisdateien zu.

Der grobe Ablauf der akustischen Messung beinhaltet sechs Schritte:

1. Aufnahme und lokale Ablage der Kalibriersignale der akustischen Messkette,
2. Durchführen der Messfahrten bei unterschiedlichen Betriebspunkten und lokale Speicherung der aufgenommenen Signale,
3. Durchführen der Messfahrten bei unterschiedlichen Drehzahlen und lokale Speicherung der aufgenommenen Signale,
4. Einlesen und Analyse der Kalibrierdaten zur Kalibrierung der Messkette,
5. Einlesen und Analyse der Daten der Mess- und Hochfahrten unter der Berücksichtigung der Kalibrierung,
6. Darstellung der Ergebnisse.

8.1 Die Datenakquirierung

Die Akquirierung der akustischen Signale gliedert sich in drei Abschnitte:

1. Aufnahme der Kalibriersignale der Messkette,
2. Aufnahme während der Drehkanalmessfahrten bei unterschiedlichen Betriebspunkten bei einer eingestellten Ventilatordrehzahl,
3. Aufnahme während der Drehkanalmessfahrten bei unterschiedlichen Ventilatordrehzahlen bei einer eingestellten Drosselstellung.

Zur Abarbeitung der drei Abschnitte ist das Programm DK_Messfahrt_Aufnahme_XXXXXX.vi zweimal nacheinander zu starten. Mit dem ersten Durchlauf werden die Abschnitte 1 und 2 bearbeitet. Im zweiten Durchlauf kann die erneute Aufnahme der Kalibriersignale übergangen werden um Abschnitt 3 durchzuführen.

Der Programmteil für die Steuerung des Drehkanals übernimmt die Kommunikation mit der Positioniersteuerung. Seine Aufgabe ist es, den Drehkanal zu Beginn jeder Messreihe in eine reproduzierbare Startposition zu bewegen. Bei mehreren aufeinander folgenden Messungen sorgt er dafür, dass sich der Drehkanal abwechselnd nach links und rechts dreht, um ein Aufwickeln des Mikrofonkabels auf dem Drehkanal zu vermeiden. Nach Beendigung dieser Messfahrten wird der Kanal bei Bedarf in seine Ausgangsstellung zurückgedreht.

Die Elemente der Datenakquirierung dienen der Aufnahme und lokalen Ablage der akustischen Daten auf einer Festplatte. Die Speicherung dieser Daten erfolgt im verbreiteten WAV-Format. Während der Messung werden zwei Signaltypen aufgezeichnet:

1. Kalibriersignale,
2. Signale der Messfahrten,

8.2 Bedienung des Mess- und Steuerprogramms DK_Messfahrt_Aufnahme_XXXXXX.vi

Das Mess- und Steuerprogramm DK_Messfahrt_Aufnahme_XXXXXX.vi ist unter LabVIEW aufzurufen und wird über das Frontpanel (Abbildung 8.1) gesteuert. Nach dem Programmstart über Knopf (1) und der Aktivierung über Knopf (4) beginnt der Programmablauf oben links und wird in Leserichtung nach unten rechts fortgeführt.

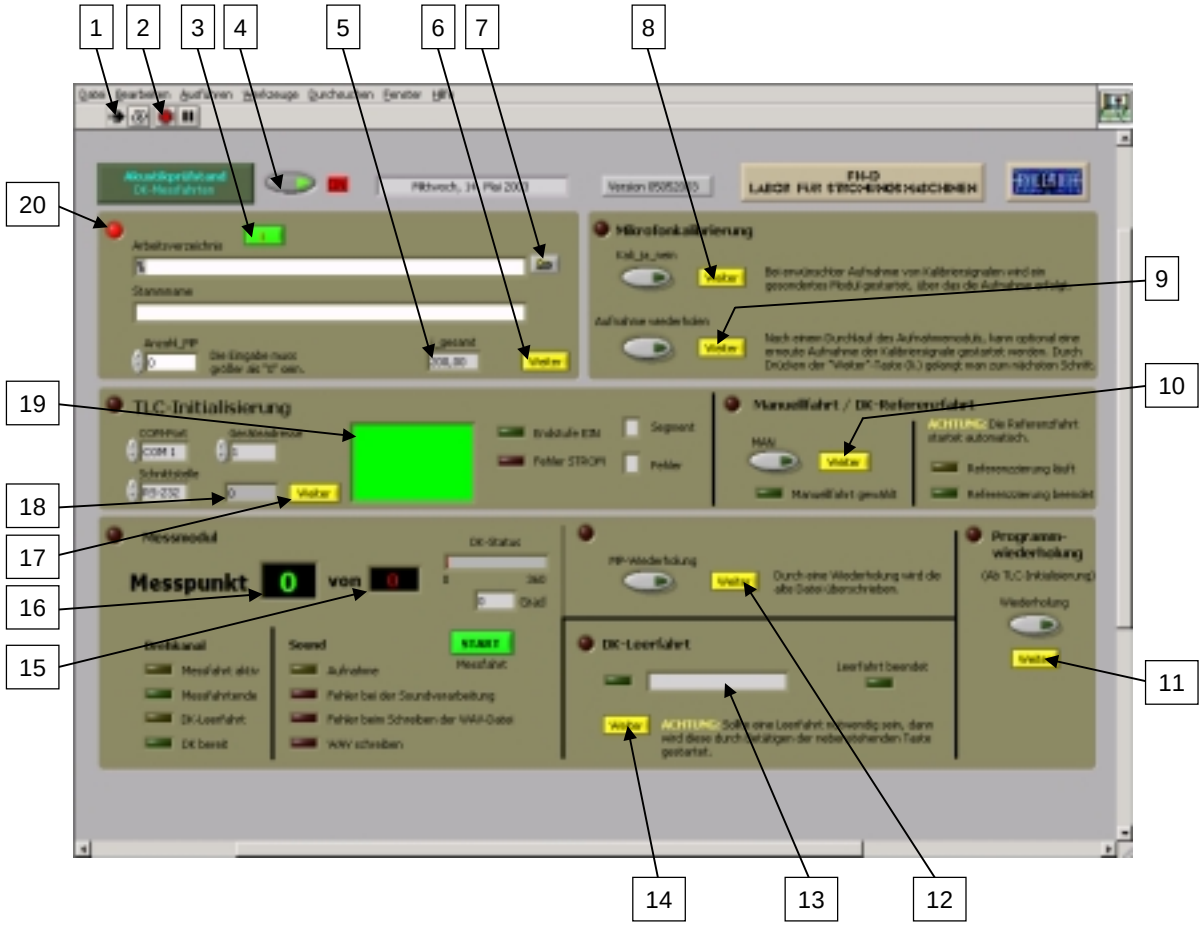


Abbildung 8.1: Frontpanel zur Bedienung des Mess- und Steuerprogramms DK_Messfahrt_Aufnahme_XXXXXX.vi.

Über leuchtende Lampen (20) wird dem Benutzer mitgeteilt, bei welchem der folgenden acht Programmteilschritte er sich gerade befindet:

1. Eingabe des Ablageverzeichnisses, des Dateinamens und der Anzahl der zu messenden Betriebspunkte,
2. optionale Aufnahme von Kalibriersignalen,
3. Initialisierung der Positioniersteuerung,
4. optionale Bewegung des Drehkanals über eine manuelle Bedienung, anschließend automatische Referenzfahrt des Drehkanals in seine Startposition,
5. Durchführen der Messfahrt,
6. optionale Wiederholung einer Messfahrt wählen,
7. Freigabe einer erforderlichen Leerfahrt in die Ausgangsstellung,
8. optionale Ablaufwiederholung ab Schritt 4.

8.2.1 Schritt 1: Programmeingaben

Zunächst wird über die Taste (7) das Verzeichnis für die Ablage der aufgezeichneten Signale gewählt, bzw. erstellt. Dies geschieht in dem dafür erscheinenden Fenster (Abbildung 8.2). Der Vorgang muss über die Taste „Verzeichnis wählen“ (1) (Abbildung 8.2) beendet werden.

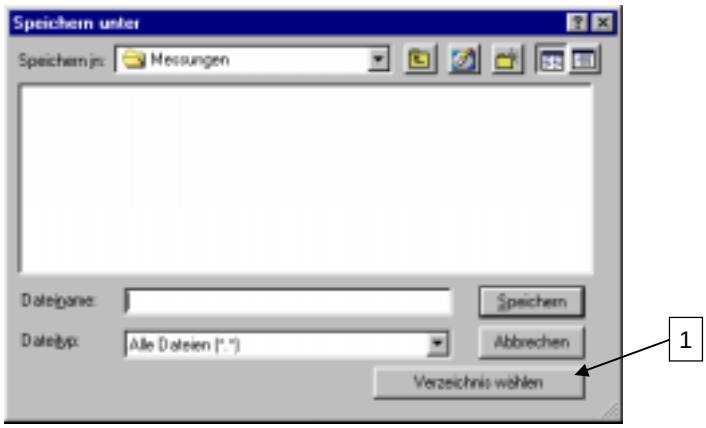


Abbildung 8.2: Fenster zur Wahl oder Erstellung des Arbeitsverzeichnisses.

Zurück im Frontpanel wird das aktuelle Verzeichnis im Feld „Arbeitsverzeichnis“ angezeigt. Als nächstes erfolgt die Eingabe des Stammnamens (im Feld „Stammname“) für die abgelegten Dateien. Die während des Programmablaufs erstellten WAV-Dateien haben die folgende Namensstruktur:

[Stammname][Kennung].WAV

Der Bereich des „Stammnamens“ steht dem Benutzer zur freien Benennung zur Verfügung, wobei auf die Eingabe von Umlauten oder Sonderzeichen verzichtet und Leerstellen durch Unterstriche ersetzt werden müssen. Der Namensteil „Kennung“ wird vom Programm in Abhängigkeit der aufzunehmenden Signale automatisch hinzugefügt:

Aufnahmeschritt	Kennung
Aufnahme der Kalibriersignale	_KALI[Kanal]
Aufnahme der Messpunkte (Messfahrten)	_MP[Nr.]

Tabelle 8.1: Reservierte Kennungen der zwei Dateiarten.

An Stelle des Platzhalters [Kanal] wird, je nachdem über welchen Kanal Kalibriersignale aufgezeichnet werden, die Ergänzung „_li“ oder „_re“ eingefügt. An die Stelle der Platzhalter [Nr.] treten fortlaufende Nummern. Schließlich muss die Anzahl der zu messenden Betriebspunkte im Feld „Anzahl_MP“ eingegeben werden. Es werden nur Eingaben akzeptiert, die größer als „0“ sind. Solange der erste Schritt nicht beendet wurde, können über (3) nochmals die Informationen zur Struktur der Dateinamen aufgerufen werden.
Der erste Schritt ist über die Taste (6) zu beenden.

8.2.2 Schritt 2: Aufnahme der Kalibriersignale

Sollen keine Kalibriersignale aufgezeichnet werden, ist der Schalter „Kali_ja_nein“ zu deaktivieren und die Eingabe mit der Taste (8) zu quittieren. Das Programm geht dann direkt zu Schritt 3 über.
Für die Aufnahme von Kalibriersignalen, ist Schalter „Kali_ja_nein“ zu aktivieren. Nach Betätigen des Tasters (8) wird dann das Unterprogramm gestartet, welches über sein eigenes Frontpanel zu bedienen ist. Nach dessen Beendigung kann sein Aufruf wiederholt werden, indem Schalter „Aufnahme wiederholen“ aktiviert und anschließend Taste (9) gedrückt wird. Um Schritt 2 an dieser Stelle jedoch zu beenden, ist der Schalter „Aufnahme wiederholen“ zu deaktivieren.
Im Falle der Aufnahme von Kalibriersignalen ist darauf zu achten, dass die gesamte Messkette angeschlossen ist. Nach Beendigung dieses Schrittes dürfen an der Messkette keine Veränderungen mehr vorgenommen werden, die eine erneute Kalibrierung erfordern würden, dies schließt auch die Line-In-Einstellung in der Windowsumgebung ein.
Die Bedienung des Unterprogramms zur Aufnahme der Kalibriersignale wird in Abschnitt 8.4 (S. 77) beschrieben.

8.2.3 Schritt 3: Initialisierung der Positioniersteuerung

Zur Initialisierung der Positioniersteuerung sind die folgenden Eingaben erforderlich:

1. Angabe des COM-Ports des PCs, an dem die Positioniersteuerung angeschlossen ist, im Feld „COM-Port“,
2. Angabe, ob die RS232- oder die RS485-Schnittstelle der Positioniersteuerung verwendet wird, in Feld „Schnittstelle“,
3. Wahl der Geräteadresse unter „Geräteadresse“.

Nach Quittieren der Eingaben über die Taste (17) zeigt das Ausgabefeld (19) an, ob die Positioniersteuerung ansprechbar ist. Ist dies nicht der Fall, müssen die Eingaben 1 bis 3 oder die Anschlüsse zur Steuerung überprüft werden. Eine erfolgreiche Initialisierung ist durch Leuchten der Lampe „Endstufe EIN“ und der Anzeige einer „6“ im Feld „Segment“ gekennzeichnet.
Darüber hinaus werden folgende Fehler in diesem Schritt angezeigt:

- Ein Fehler bei der Einrichtung der seriellen Schnittstelle wird durch eine von „0“ abweichenden Anzeige unter (18) angegeben.
- Ist die Netzspannungsversorgung der Positioniersteuerung nicht angeschlossen, leuchtet die Lampe „Fehler STROM“.
- Eine von „0“ abweichende Anzeige bei „Fehler“ zeigt einen Fehler während der Kommunikation zwischen PC und Positioniersteuerung an.

Der Inhalt der Felder „Segment“ und „Fehler“ wird während der gesamten im Programmablauf stattfindenden Kommunikation zwischen PC und Positioniersteuerung aktualisiert.

8.2.4 Schritt 4: Manuellfahrt und Referenzzierung

Wenn nötig, kann der Drehkanal über manuell erteilte Befehle bewegt werden. Dies ist besonders bei der ersten Installation des Mikrofons zu empfehlen, um zu testen, ob es beim Aufwickeln des Mikrofonkabels während einer Kanalumdrehung zu Problemen kommt.
Durch Aktivieren von Schalter „MAN“ und nachfolgender Quittierung über Taster (10), wird ein spezielles Modul gestartet, welches über ein eigenes Frontpanel bedient wird. Die Bedienungsbeschreibung dieses Unterprogramms erfolgt in Abschnitt 8.5 (S. 79).

Um diesen Teilschritt zu übergehen ist der Schalter „MAN“ zu deaktivieren bevor mit der Taste (10) bestätigt wird.
Als nächstes erfolgt die automatische Referenzzierung des Drehkanals. Der Drehkanal fährt dabei aus seiner aktuellen Position in negativer Richtung in seine Startposition. Die blinkende Lampe „Referenzzierung läuft“ signalisiert die Bearbeitung dieses Vorgangs. Das Erreichen der Startposition wird durch Leuchten der Lampe „Referenzzierung beendet“ angezeigt. Der Drehkanal steht nun in seiner Ausgangsposition für die Messfahrten.

8.2.5 Schritt 5: Messfahrt

Aus den Anzeigen (16) und (15) ist zu entnehmen, welcher der zu messenden Messpunkte als nächstes bearbeitet wird. Die Messfahrt wird über die Starttaste „Messfahrt“ gestartet. Ein Statusbalken („DK-Status“) informiert über den Fortschritt der Kanalumdrehung, während der die Anzeigen „Messfahrt aktiv“ und „Aufnahme“ blinken. Das Ende der Messfahrt signalisiert die Lampe „Messfahrtende“, danach werden die Daten abgespeichert. Dieser Vorgang wird durch die Lampe „WAV schreiben“ gekennzeichnet.

8.2.6 Schritt 6: Messfahrtwiederholung

Um zum nächsten Messpunkt überzugehen, muss der Schalter „MP-Wiederholung“ deaktiviert sein, erst dann ist über die Taste (12) zu quittieren.
Soll der letzte Messpunkt wiederholt gemessen werden, ist der Schalter zu aktivieren. Da bei einer Wiederholung die alte WAV-Datei überschrieben wird, kommt es beim Speichervorgang zu folgender Meldung:

Abbildung 8.3: Einholen der Bestätigung zum Ersetzen der bestehenden Datei.

Die Wahl von „Ersetzen“ überschreibt die alte Datei. Durch Abbrechen an dieser Stelle erscheint eine Fehlermeldung:

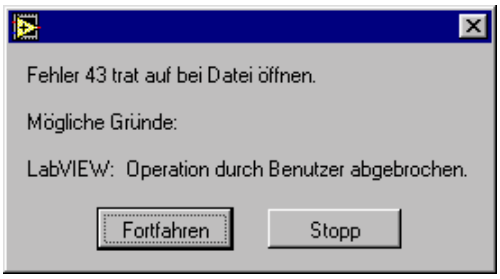


Abbildung 8.4: Fehlermeldung, wenn vor dem Überschreiben der vorhandenen Datei abgebrochen wird.

Über den Taster „Fortfahren“ gelangt man zurück zum Programmablauf, die Datei wird dann nicht überschrieben. Die Taste „Stopp“ beendet den gesamten Programmablauf.

8.2.7 Schritt 7: Leerfahrt

Steht der Drehkanal nach den erfolgten Messfahrten mit aufgewickeltem Mikrofonkabel, so wird eine sogenannte Leerfahrt zum Abwickeln des Kabels in die Ausgangsstellung durchgeführt. Ob eine solche Fahrt erforderlich ist, ist dem Feld (13) zu entnehmen. Aus Sicherheitsgründen wird diese Fahrt erst nach Betätigung der Taste (14) gestartet. Der Drehkanal bewegt sich dabei mit einer höheren Geschwindigkeit als bei der Messfahrt. Die Motordrehzahl beträgt bei der Leerfahrt 350 min^{-1} statt 200 min^{-1}, wie bei der Messfahrt. Erreicht der Drehkanal seine Ausgangsstellung, leuchtet die Lampe „Leerfahrt beendet“.

8.2.8 Schritt 8: Programmwiederholung

Mit diesem Schritt ist die Messreihe beendet und es liegen die WAV-Dateien der Messfahrten, sowie, wenn durchgeführt, die Dateien der Kalibriersignale, lokal vor.
Wenn nötig, kann die Messreihe ab Schritt 4 wiederholt werden, dabei gelten weiterhin die Einstellungen aus Schritt 1. Eine Bestätigung über die Taste (11) bei aktiviertem Schalter „Wiederholung“ führt die Wiederholung durch, bei deaktiviertem Schalter wird das Programm beendet.

8.3 Bedienung des Programms DK_Stillstand_Aufnahme_XXXXXX.vi

Dieses Programm wird ebenfalls unter LabVIEW aufgerufen. Es dient lediglich der Aufnahme von akustischen Signalen. Die Aufnahme wird manuell über Start- und Stopptasten gesteuert.

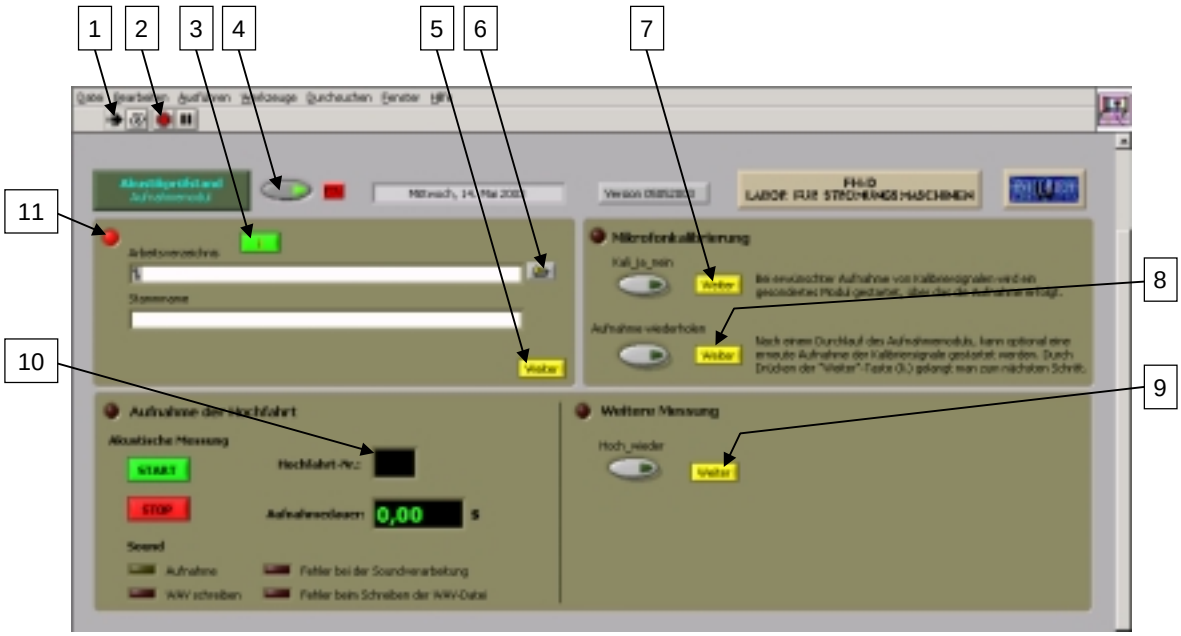


Abbildung 8.5: Frontpanel zur Bedienung des Aufnahmeprogramms DK_Stillstand_Aufnahme_XXXXXX.vi.

Der Programmstart und die ersten beiden Schritte entsprechen denen des Programms DK_Messfahrt_Aufnahme_XXXXXX.vi, nur dass hier keine Anzahl der Messpunkte eingegeben werden muss:

1. Eingabe des Ablageverzeichnisses und des Dateinamens,
2. optionale Aufnahme von Kalibriersignalen,
3. Start und Stopp der Aufnahme,
4. optionale Programmwiederholung.

8.3.1 Schritt 3: Steuerung der Aufnahme

Nach dem zweiten Schritt wird über die Starttaste die Aufnahme begonnen. Zur Orientierung wird die Aufnahmedauer in Sekunden angezeigt. Zur Beendigung der Aufnahme ist die Stopptaste zu drücken. Während der Aufnahme blinkt die Lampe „Aufnahme“. Die Anzeige „WAV schreiben“ leuchtet, wenn die Datei abgespeichert wird. Der Dateiname weist die unter Abschnitt 8.2.1 beschriebene Namensstruktur auf. Dieses Programm hängt als Kennung

die Zeichenfolge „_HOCH“ gefolgt von einer fortlaufenden Nummer an den Datei-stammnamen an.

8.3.2 Schritt 4: Optionale Programmwiederholung

Durch Aktivieren des Schalters „Hoch_wieder“ und der nachfolgenden Quittierung mit der Taste (9) wird eine weitere Aufnahme möglich. Das Programm kehrt zu Schritt 3 zurück. Der Zähler in der Anzeige (10) wird inkrementiert.

8.4 Bedienung des Unterprogramms zur Aufnahme der Kalibriersignale

Durch Wahl der Aufnahme von Kalibriersignalen (Abschnitt 8.2.2) wird das folgende Frontpanel angezeigt:

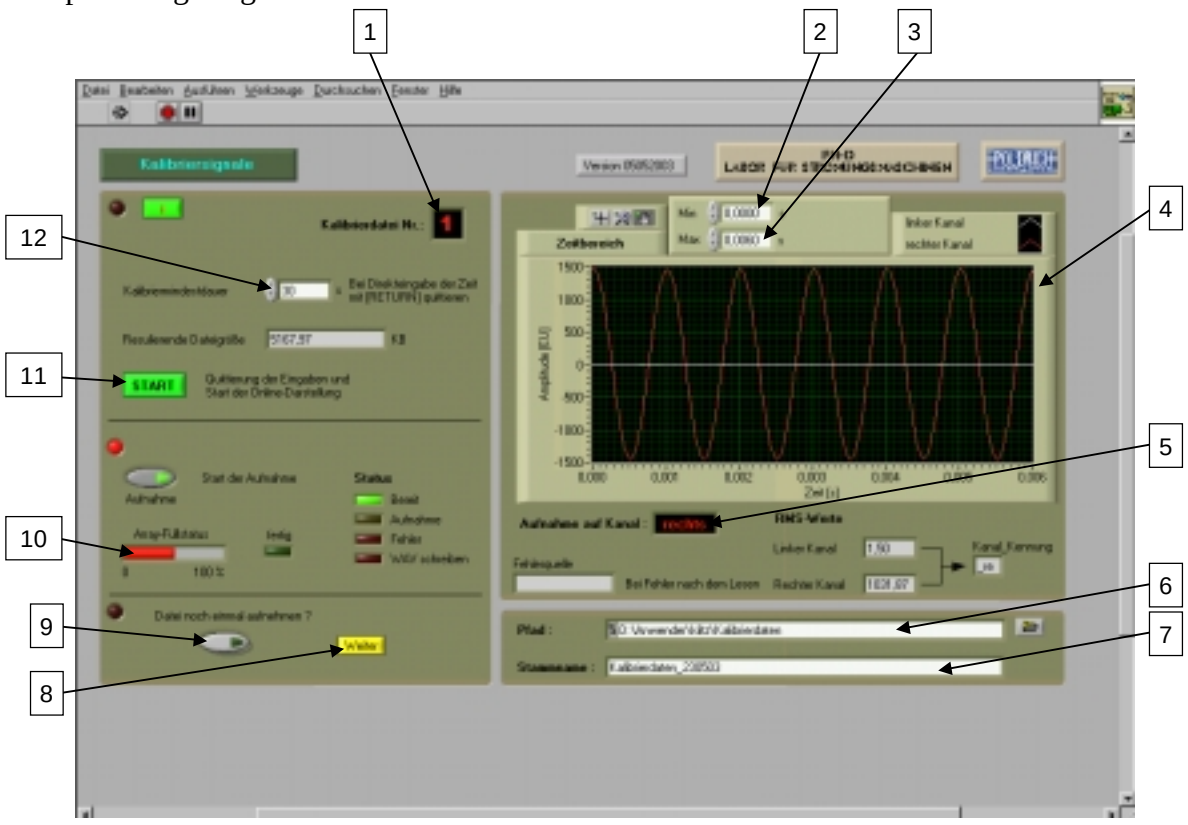


Abbildung 8.6: Frontpanel der Subroutine zur Aufnahme der Kalibriersignale: Hier während der Aufnahme eines Kalibriersignals mit 1000 Hz über den rechten Kanal.

Es werden zwei Dateien aufgezeichnet. Der Anzeige (1) ist zu entnehmen, welche dieser Dateien gerade erstellt werden soll. Die Anzeigezeilen (6) und (7) informieren über das aktuelle Verzeichnis und den gegenwärtigen Stammnamen, eine Änderung beider Werte ist nicht möglich. Unter (12) ist die Aufnahmedauer einzustellen, sie steht standardmäßig auf 30 s.

Nach Betätigen der Taste (11) wird das anliegende Signal beider Kanäle im Diagramm (4) angezeigt. Die rote Kurve gibt den Zeitverlauf des rechten, die weiße Kurve den des linken Kanals wieder. Der Darstellungsbereich ist über die Feder (2) und (3) einzustellen, sie geben standardmäßig einen Bereich von 0 bis 0,006 Sekunden vor. Das Programm zeigt zudem an, an welchem Kanal das Kalibriersignal erkannt wurde (5). Anhand des Zeitdiagramms kann eine Übersteuerung des Line-In-Eingangs erkannt werden. Bei einer vorliegenden Übersteuerung, erkennbar am „Clipping“ (vgl. Anhang 20.10) ist die Line-In-Aussteuerung im Betriebssystem nachzuregeln bis die Kurvenform im Zeitverlauf korrekt wiedergegeben wird. Die vorgenommene Reglerstellung darf während der Aufnahme der Kalibriersignale und der späteren Messfahrten nicht mehr verändert werden.

Erst durch Aktivieren des Schalters „Aufnahme“ wird die Aufnahme gestartet. Ihr Fortschreiten ist am Statusbalken (10) erkennbar. Nach Abschluss der Aufnahme wird die WAV-Datei geschrieben, was durch Leuchten der Lampe „WAV schreiben“ signalisiert wird. Durch Einschalten von Schalter (9) und Quittieren über Taste (8) kann die Aufnahme wiederholt werden. Im anderen Fall wird die Aufnahme der zweiten Datei eingeleitet oder das Unterprogramm beendet und zu dem Mess- und Steuerprogramm zurückgekehrt.

Im Anhang 20.10 ist am Beispiel des Kalibriersignals von 250 Hz mit 124 dB die Darstellung im Zeitbereich bei einer guten Aussteuerung und einer Übersteuerung des Line-In-Eingangs aufgeführt.

8.5 Bedienung des Unterprogramms zur Durchführung einer Manuellfahrt

Die Manuellfahrt wird über folgendes Frontpanel gesteuert:

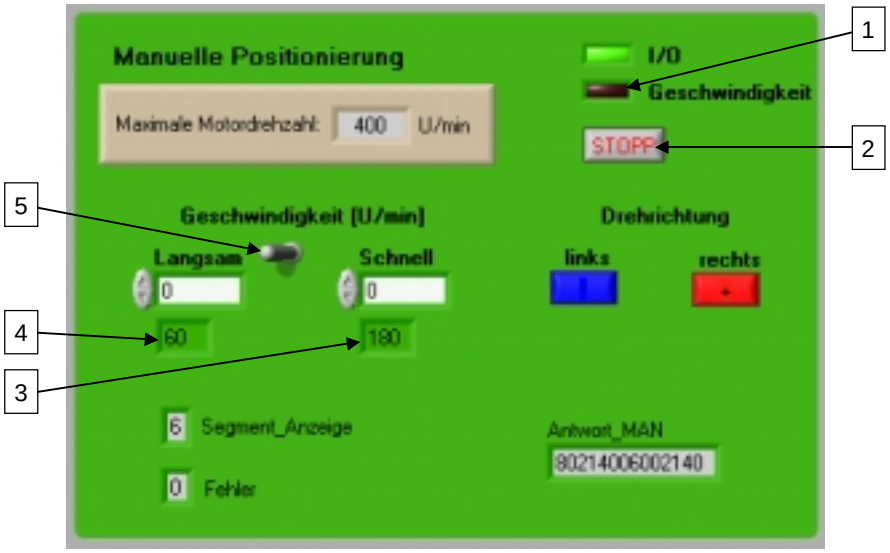


Abbildung 8.7: Frontpanel des VIs zur Steuerung der Manuellfahrt.

Es wird für die Bewegung des Drehkanals zwischen einer langsamen und einer schnellen Geschwindigkeit unterschieden, zwischen denen über Schalter (5) hin- und hergeschaltet werden kann. Die jeweiligen Drehzahlen des Schrittmotors sind in den Feldern (3) und (4) angegeben. Zudem können für beide Geschwindigkeiten Eintragungen in den Feldern „Langsam“ und „Schnell“ vorgenommen werden. Bei schneller Fahrt leuchtet die Lampe (1). Zum Schutz der Anlage kann maximal eine Drehzahl von 400 min^{-1} vorgegeben werden. Die Bewegung des Drehkanals wird über die beiden Taster „links“ und „rechts“ gesteuert (vgl. auch Abbildung 8.8). Über die Stopptaste (2) kann das Unterprogramm beendet werden. Kommt es durch Anfahren eines Endschalters zum Stillstand, zeigt die „Segment_Anzeige“ eine „7“ an. In diesem Fall ist der Drehkanal in die entgegengesetzte Richtung aus dem Schaltbereich herauszufahren.

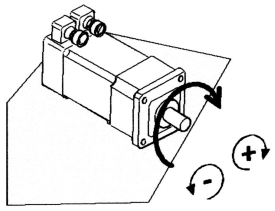


Abbildung 8.8: Visualisierung der positiven und negativen Motordrehrichtung.

8.6 Hinweise zur Bedienung des Mess- und Steuerprogramms

8.6.1 Messkette und Soundeinstellung

Es ist besonders wichtig, dass spätestens zur Aufnahme der Kalibriersignale die gesamte zur Anwendung kommende akustische Messkette angeschlossen ist. Nach der Aufnahme der Kalibriersignale darf die Messkette und die Line-In-Aussteuerung nicht mehr verändert werden.

8.6.2 Anlageneinrichtung

Vor dem ersten Betrieb des Drehkanals sind der Ausgangszustand der Positioniersteuerung, der Endschalter nach Abschnitt 6.2 und die anlagenspezifischen Einstellungen im LabVIEW-Programm in der ersten Sequenz (vgl. Abschnitt 9.4.3) zu prüfen.

8.6.3 Initialisierung der Positioniersteuerung

Sollte das Programm die Steuerung trotz korrekten Anschlusses und richtiger Schnittstellenangaben nicht auf Anhieb erkennen, ist die Taste (17) ein weiteres Mal zu drücken.

8.6.4 Bediengeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit der Bedienung sollte sich an der Programmgeschwindigkeit orientieren, d.h., dass die Bearbeitung eines Schrittes erst gestartet werden darf, wenn das Programm seine Bereitschaft dazu bekannt gibt.

8.6.5 Nachträgliches Hinzufügen von Messpunkten

Sollen abweichend von der Eingabe unter Schritt 1 mehr Messpunkte aufgenommen werden, so ist nach dem letzten regulären Messpunkt eine Wiederholung einzuleiten (Schritt 6 in Abschnitt 8.2.6). Vor der Quittierung über Taste (12), muss der Dateiname, beispielsweise im Windowsexplorer, des letzten Messpunktes geändert werden, um ein Überschreiben auszuschließen. Analog ist bei einer weiteren Messung vorzugehen.

8.6.6 Fehler bei der Soundverarbeitung

Kommt es während einer Messfahrt oder des Speichervorgangs zu einem Fehler bei der Soundverarbeitung (Lampen „Fehler bei der Soundverarbeitung“ und „Fehler beim Schreiben der WAV-Datei“), so ist das Programm zu stoppen (Taste (2) in Abbildung 8.1) und neu zu starten. Die bis dahin erstellten Dateien sind vor einem Überschreiben zu schützen, z.B. indem sie in ein zusätzliches Verzeichnis verschoben werden. Die Messungen starten dann wieder mit dem Messpunkt 1 (Kennung „_MP1“).

8.7 Bedienung der Analyseprogramme

Die Analyseprogramme sind jeweils unter MATLAB zu starten. Ihre Quellcodes sind im Anhang 20.15 zu finden. Sie sind in der folgenden Reihenfolge anzuwenden:

1. Kalibrierfaktor_Kanal_bereich.m
2. Wav_Analyse_Programm_auto.m
3. Mat_lesen_darstellen.m

8.7.1 Kalibrierung der Messkette

Die Systematik der programmierten Kalibrierung ist in Abschnitt 12 beschrieben. Das Programm Kalibrierfaktor_Kanal_bereich.m ist für die Analyse der WAV-Dateien als erstes anzuwenden. Es berechnet die Kalibrierfaktoren aus den Kalibriersignalen und legt diese in einer Textdatei ab. Bevor es gestartet wird, ist sicherzustellen, dass die folgenden beiden Dateien existieren:

[Stammname]_KALI_re.wav	(Datei mit den Kalibriersignalen des rechten Kanals)
[Stammname]_KALI_li.wav	(Datei mit den Kalibriersignalen des linken Kanals)

Nach dem Programmstart muss die Datei „[Stammname]_KALI_re.wav“ der zu analysierenden Messreihe angewählt werden. Die automatisch berechneten Kalibrierfaktoren werden in folgender Textdatei im Verzeichnis der WAV-Dateien abgelegt:

[Stammname]_Kalibrierfaktor.txt

Anschließend erfolgt für beide Kanäle eine Darstellung des unkalibrierten linearen Autopowerspektrums und des kalibrierten Autopowerspektrums in logarithmierter Skalierung (vgl. Abbildung 12.1, S.119).

8.7.2 Analyse der aufgezeichneten WAV-Dateien

Das Analyseprogramm Wav_Analyse_Programm_auto.m analysiert automatisch nacheinander alle WAV-Dateien einer Messreihe. Die Ergebnisse werden in einem automatisch erstellten Verzeichnis abgespeichert, wo für jede analysierte Datei eine Ergebnisdatei im MAT-Format abgelegt wird. Vor dem Start ist über die Blockgröße die gewünschte Frequenzauflösung Δf der zu erstellenden Spektren nach folgender Gleichung einzustellen:

$$\Delta f = \frac{44100\ \text{Hz}}{\text{Blockgröße}} \qquad (8.1)$$

Für die Blockgröße ist ein Wert zu setzen, der zur Basis 2 geschrieben werden kann. Als Standardwert ist eine Blockgröße von „32768“ vorgegeben.
Nach dem Programmstart muss im Kommandofenster angegeben werden, ob der rechte oder der linke Kanal der WAV-Dateien analysiert werden soll. Danach erfolgt die Eingabe der Datei des ersten Messpunktes über ein Auswahlfenster:

[Stammname]_MP1.wav

Es ist sicherzustellen, dass diese Datei existiert. Bei mehreren Messpunktdateien ist auf eine fortlaufende Nummerierung („_MPX“) zu achten. Außerdem muss die Textdatei mit den Kalibrierfaktoren vorhanden sein. Alle Dateien müssen im selben Verzeichnis stehen.
Nach Ablauf des Programms, kann eine weitere Messreihe analysiert werden.

8.7.3 Darstellung der Ergebnisse

Das Programm Mat_lesen_darstellen.m dient der Darstellung der berechneten Spektren. Das Programm liest solange Ergebnisdateien (vgl. 8.7.2) ein, bis ein weiteres Laden vom Benutzer verneint wird. Dargestellt werden das unbewertete Autopowerspektrum, das unbewertete Terzspektrum und der zeitliche Verlauf des Gesamtschalldruckpegels. Nach dem Programmstart muss über ein Menü (Abbildung 8.9) entschieden werden, ob für jede geladene Ergebnisdatei drei separate Diagramme („Einzeldiagramme“) oder ob alle Kurvenverläufe jeweils in

einem Diagramm zur Gegenüberstellung mehrerer Ergebnisse („Multidiagramme“) erstellt werden sollen. Über „Abbruch“ kann das Programm verlassen werden.

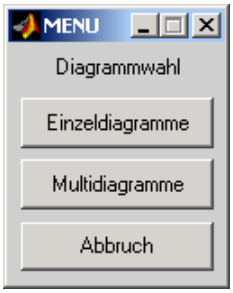


Abbildung 8.9: Startmenü des Programms Mat_lesen_darstellen.m.

Der Menüpunkt „Einzeldiagramme“ ermöglicht nur die Darstellung der Ergebnisdateien. Mit der Wahl „Multidiagramme“ besteht die Möglichkeit zusätzlich ein Vergleichs-Terzspektrum einzulesen. Das Vergleichsterzspektrum muss in Form einer zweispaltigen Textdatei vorliegen, in der linken Spalte die Nennterzmittenfrequenzen und in der rechten die jeweiligen Pegel. Beide Spalten sind durch einen Tabulator zu trennen und als Dezimaltrennzeichen ist der Punkt vorzusehen. Außer diesen beiden Spalten darf die Datei keine weiteren Einträge enthalten. Es kann nur ein Vergleichsspektrum eingelesen werden, danach wird das Programm beendet.

9 Programmierung des Mess- und Steuerungsprogramms

Das LabVIEW-Programm DK_Messfahrt_Aufnahme_XXXXXX.vi sollte die Aufnahme akustischer Signale während einer Drehkanalumdrehung ermöglichen. Dazu musste es zum einen über Routinen für die Kommunikation mit der Positioniersteuerung und zum anderen über Strukturen für die Aufnahme und Ablage der akustischen Signale verfügen. Die nachfolgenden Ausführungen beschreiben wesentliche Punkte der Programmentwicklung. Nach einer Auflistung wesentlicher Anforderungen an das Programm und seiner Struktur wird zunächst die Umsetzung der Kommunikation zwischen dem PC und der Positioniersteuerung beschrieben, bevor auf wesentliche Programmteile eingegangen wird.

9.1 Anforderungen an das Mess- und Steuerungsprogramm

Neben der eingangs bereits erwähnten Anforderung akustische Signale während einer Drehkanalumdrehung aufzuzeichnen, waren bei der Entwicklung weitere Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

- Die Anzahl der Messpunkte ist zum Programmstart einzugegeben,
- die Messfahrten des Drehkanals sollen abwechselnd in die linke und in die rechte Richtung erfolgen, um ein Aufwickeln des Mikrofonkabels zu verhindern,
- für den Fall, dass der Drehkanal nach einer Messreihe mit aufgewickeltem Mikrofonkabel stehen bleibt, soll er automatisch zurückgedreht werden,
- jede Messfahrt soll sich über eine volle Umdrehung erstrecken und 1 Minute dauern,
- die Aufzeichnung der akustischen Signale soll über die PC-Soundkarte in CD-Qualität erfolgen, d.h. mit einer Abtastrate von 44100 Hz und einer Auflösung von 16 bit im Stereo-Format,
- es soll eine optionale Aufnahme von Kalibriersignalen möglich sein, bei der die Aufnahmedauer einstellbar ist. Außerdem soll zumindest das Zeitsignal angezeigt werden, wobei bei einem Kalibriersignal mit 1000 Hz mindestens 6 Perioden sichtbar sein müssen,
- bei der Aufnahme der Kalibriersignale sollen stets beide Kanäle nacheinander aufgezeichnet werden.

Während der ersten Entwicklungsschritte ergaben sich folgende zusätzliche Aspekte:

- Vor jeder Messreihe sollte der Drehkanal eine automatische Referenzzierung auf eine Ausgangsposition durchführen, um eine reproduzierbare Ausgangsstellung zu gewährleisten.
- Um ein Überdrehen des Drehkanals über deutlich mehr als 360° hinaus zu unterbinden, war der Drehbereich mit Endschaltern zu begrenzen.
- Eine Visualisierung der Drehkanaldrehung wurde in Form eines Statusbalkens eingebunden, um auch über den Fortschritt der Drehkanaldrehung informiert zu sein, wenn die direkte Sicht versperrt sein sollte.

9.1.1 Programmierumgebung

Das Programm wurde in LabVIEW 6i der Firma National Instruments auf einem Windows 98-System entwickelt. Für die Arbeit stand ein PC mit Intel Celeron Prozessor, der mit 500 MHz getaktet war und über 128 MB RAM verfügte, zur Verfügung.

9.2 Programmstruktur

Das Programm wurde in sechs übergeordneten Sequenzen programmiert, um die Ablaufschritte zu strukturieren:

Sequenz 1 : In dieser Sequenz werden die Ausgangszustände des Programms hergestellt.

Sequenz 2 : Mit dieser Sequenz werden die Angaben zum Dateinamen und des Speicherortes der Messdaten eingeholt.

Sequenz 3 : Die Sequenz bietet bei Bedarf die Möglichkeit Kalibriersignale aufzunehmen.

Sequenz 4 : Hier wird die Positioniersteuerung initialisiert.

Sequenz 5 : Es werden Voreinstellungen an der Positioniersteuerung vorgenommen. Danach wird eine Manuellfahrt angeboten. Im nächsten Schritt fährt der Drehkanal in seine Ausgangsstellung. Im letzten Teil dieser Sequenz wird die eigentliche Messfahrt ausgeführt.

Sequenz 6 : Diese Sequenz schaltet die Endstufe der Positioniersteuerung aus und beendet das Programm.

Die nachfolgende Tabelle stellt die Struktur des Programms detailliert dar und ordnet die einzelnen Programmpunkte den jeweiligen Untersequenzen zu. Im Anhang 20.12 ist das zugehörige Flussdiagramm enthalten.

H-Seq.	Inhalt DK_Messfahrt_Aufnahme_XXXXXX.vi
0	**Einschalten** In einer While-Schleife wird der Einschaltknopf abgefragt, über den der Programmablauf gestartet wird. Vorgabe von Eingangszuständen der Schalter, Lampen und Variablen, Anlageneinstellung: Vorgabe der Drehkanalübersetzung und der Inkrementanzahl pro Motorumdrehung (als Konstanten); Berechnung des Umrechnungsfaktors (Inkremente pro Grad).
1	**Messangaben** Eingabe: (While-Schleife): des Arbeitsverzeichnisses, des Stammnamens, der Anzahl der Messpunkte Information zu den Dateinamen möglich, über i-Taste abrufbar
2	**Aufnahme der Kalibrierdateien für die Mikrofonkalibrierung** Optional kann die Aufnahme von Kalibriersignalen gewählt werden (While-Schleife) (Case-Anweisung): True (Die Aufnahme von Kalibriersignalen soll durchgeführt werden): 0 Starten des Moduls zur Aufnahme der Kalibriersignale. Der Ablauf wird in einem separaten Fenster gesteuert. 1 Optionale Wiederholung der Aufnahme der Kalibriersignale (While-Schleife) False: Keine Kalibriersignale aufnehmen Die Aufnahmeroutine kann bei Bedarf wiederholt werden.
3	**Twin Line Steuerung initialisieren** 0 Initialisierung und Adressieren der TwinLine-Steuerung (While-Schleife): 0 Eingabe (While-Schleife): des COM-Ports, der Schnittstellenart (RS 232 oder RS 485) und der Geräteadresse 1 Serielle Schnittstelle initialisieren 2 TLC-Steuerung adressieren (Der Vorgang wird in einer For-Schleife 3 mal wiederholt)
4	**Das Messprogramm** Das Messprogramm läuft in einer While-Schleife ab. 0 Vorbereiten der Schrittmotorsteuerung (Voreinstellungen): 0 Betriebszustand der Steuerung abfragen 1 Auf ermittelten Betriebszustand reagieren: Ziel ist das Einschalten der Endstufe. 2 Voreinstellungen: 0 Vorgabe der Motorbeschleunigung [U/(min·s)], 1 Vorgabe der Motorverzögerung [U/(min·s)], 2 Vorgabe des Sicherheitsabstandes von der Schaltkante des Endschalters [usr], 3 Vorgabe der Endschaltersuchdrehzahl [min^{-1}], 4 Vorgabe der Drehzahl [min^{-1}], mit der nach Erreichen des Endschalters aus dem Schaltbereich bis zum Sicherheitsabstand gefahren wird

5 PTP-Drehzahl [min^{-1}],
die Drehzahl für die Messfahrten

1 Manuellfahrt (optional):
0 Manuellfahrt wählen (While-Schleife, Case-Anweisung)
1 (Case-Anweisung)
True:
Ausführen des Manuellfahrt-VI, wenn es ausgewählt wurde. Der Ablauf wird in einem separaten Fenster gesteuert.
False: Keine Manuellfahrt

2 Referenzfahrt auf LIMN automatisch durchführen:
0 Ref-Start (While-Schleife):
Es wird gewartet, bis die Steuerung auf Referenzfahrt geschaltet hat.
0 Befehl für die automatische Endschalteranfahrt senden,
1 Antwort der Steuerung einholen und prüfen, ob der Referenzzierzustand erreicht ist.
1 Ref-Warten (While-Schleife):
Es wird gewartet, bis der Endschalter erreicht ist.
0 Statusabfrage,
1 prüfen, ob der Endschalter erreicht ist

3 Messfahrtenschleife (While-Schleife):
0 Soundkarte konfigurieren,
1 Warten auf den Startbefehl für die Messfahrt (While-Schleife),
2 Bestimmung der nächsten Fahrtrichtung, Angabe des zu überdrehenden Winkels,
3 Messfahrt:
0 Fahrtbefehl senden (While-Schleife):
0 Senden des PTP-Befehls zum Anfahren der nächsten Position,
1 prüfen, ob die Fahrt gestartet wurde, wenn ja, dann wird die Schleife beendet
1 Aufnahme während der Messfahrt (While-Schleife):
0 Motorposition abfragen,
1 Status der Steuerung abfragen,
2 prüfen ob die Sollposition erreicht ist
Parallel läuft die akustische Messung. Bei einem Fehler in der Soundverarbeitung, oder bei einem „Quickstopp“ wird die Aufnahme gestoppt.
4 Schreiben der WAV-Datei,
5 Soundkarte schließen,
6 Abfrage, ob der Messpunkt wiederholt werden soll:
0 Wiederholung erfragen (While-Schleife):
Entscheidung, ob der MP wiederholt werden soll
1 Index m anpassen:
Anpassung an die Entscheidung über die Wiederholung
2 Anzahl_MP erreicht ?:
prüfung, ob schon die angegebene Anzahl der Messpunkte erreicht ist

4 Leerfahrt / Messreihe beenden:
0 Warten
Es wird geprüft, ob eine Leerfahrt erforderlich ist, für die Fortsetzung wird auf den Startbefehl gewartet.
1 Entscheidung über eine Leerfahrt (Case-Anweisung):
True (Eine Leerfahrt ist notwendig):
0 PTP-Drehzahl für Leerfahrt vorgeben,
1 Leerfahrt starten:
0 Senden des PTP-Befehls zum Anfahren der 0°-Position,
1 prüfen, ob die Fahrt gestartet wurde, wenn ja, dann wird die Schleife beendet
2 Leerfahrt überwachen:
0 Motorposition abfragen,
1 Status der Steuerung abfragen,
2 prüfen ob die Sollposition erreicht ist
3 Ende der Leerfahrt anzeigen.
False: Keine Leerfahrt notwendig
2 Messreihenende

5 Schluss (While-Schleife):
Abfrage, ob das Messprogramm wiederholt werden soll:
Bei einer positiven Antwort startet das Programm bei [4-0].

5	**Programm beenden** **0** Betriebszustand der Steuerung abfragen, **1** auf den Betriebszustand reagieren: Ziel ist das Ausschalten der Endstufe, **2** Serielle Schnittstelle schließen

Tabelle 9.1: Struktur des Mess- und Steuerprogramms:
Die Farben der jeweiligen Programmsequenzen wurden in die Tabelle übernommen. Die einzelnen Sequenzebenen sind wie folgt farbkodiert: Ebene 1 = dunkel blau, Ebene 2 = dunkel grün, Ebene 3 = braun, Ebene 4 = grau, Ebene 5 = magenta, Ebene der Messfahrtschleife = rot.

Für eine Referenz auf eine Sequenz werden die Sequenznummern in eckigen Klammern, getrennt durch Bindestriche, angegeben. Die eigentliche Messfahrt beispielweise beginnt in Sequenz [4-3-3].

9.3 Werkzeuge für die Kommandobearbeitung

Da die Kommunikation zwischen PC und der Positioniersteuerung einer festen Struktur folgt, wurden Subroutinen geschrieben, die das Senden und Empfangen der Kommandos übernehmen. Während die Routine zum Senden der Befehle verallgemeinert werden konnte, musste der Vorgang der Antwortauswertung individuell programmiert werden. Dafür wurden ebenfalls unterstützende Subroutinen erstellt. Im Folgenden wird auf die Kommandoerstellung, die Befehlssendung und die Auswertung der Antwort eingegangen.

9.3.1 Das erste Kommandobyte

Das „sf“-Bit ist das Bit 7 des ersten Kommandobytes. Im Ausgangszustand haben das „sf“- und das „rf“-Bit den Wert „0“. Mit dem ersten Kommando wechselt das „Master-Gerät“ (hier der PC) den Wert des „sf“-Bits auf „1“ und sendet es an die Steuerung. Diese vergleicht dieses Bit mit seinem „rf“-Bit. Stimmen beide nicht überein, erkennt sie das Kommando als neu an und bearbeitet es. Danach wechselt sie den Wert ihres „rf“-Bits auf den des eingegangenen „sf“-Bits und sendet ihn zusammen mit der Antwort an den „Master“ zurück. Dieser weiß nun aufgrund der Übereinstimmung des „sf“- und des „rf“-Bits (beide = „1“), dass der Befehl abgearbeitet wurde. Für den zweiten Befehl muss das „sf“-Bit seinen Wert wechseln.
In dem Mess- und Steuerprogramm wird mit jedem gesendeten Kommando der Wert des „sf“-Bits zwischen „0“ und „1“ gewechselt. Seitens des „Masters“ (PC) erfolgt kein Vergleich zwischen dem „sf“-Bit und dem erhaltenen „rf“-Bit. Zur Überprüfung, ob ein Fahrauftrag beendet wurde, werden andere in der Antwort enthaltene Statusbits ausgewertet.

Um den Wert des „sf“-Bits mit jedem Befehl zu wechseln, wurde ein Befehlszähler im Programm vorgesehen:

$$\text{Zähler}\begin{cases}\text{gerade}, & \text{sf}-\text{Bit}=0\\ \text{ungerade}, & \text{sf}-\text{Bit}=1\end{cases}$$

Der Wert des ersten Kommandobytes wird neben dem „sf“-Bit noch durch das Bit 2 bestimmt. Mit diesem Bit wird der Steuerung mitgeteilt, ob ein Kommando geschrieben oder eine Information gelesen werden soll („1“ = schreiben, „0“ = lesen). Mit beiden Bits ergeben sich insgesamt vier Kombinationen.

Bit 7	**Bit 2**	**dez**	**hex**	**Bedeutung**
0	0	0	00	„sf“ = 0, Wert lesen
0	1	4	04	„sf“ = 0, Wert schreiben
1	0	128	80	„sf“ = 1, Wert lesen
1	1	132	84	„sf“ = 1, Wert schreiben

Tabelle 9.2: Zustände der Bits 2 und 7, Bit 7 ist das „sf“-Bit.

Die Information darüber, welchen Wert die beiden Bits einnehmen kann nach Tabelle 9.2 auch aus der hexadezimalen Schreibweise des ersten Bytes entnommen werden.

9.3.2 Zusammenstellen der Kommandozeichenkette

In der in (Abbildung 9.1) abgebildeten Schleife wird die Kommandozeichenkette zusammengestellt.

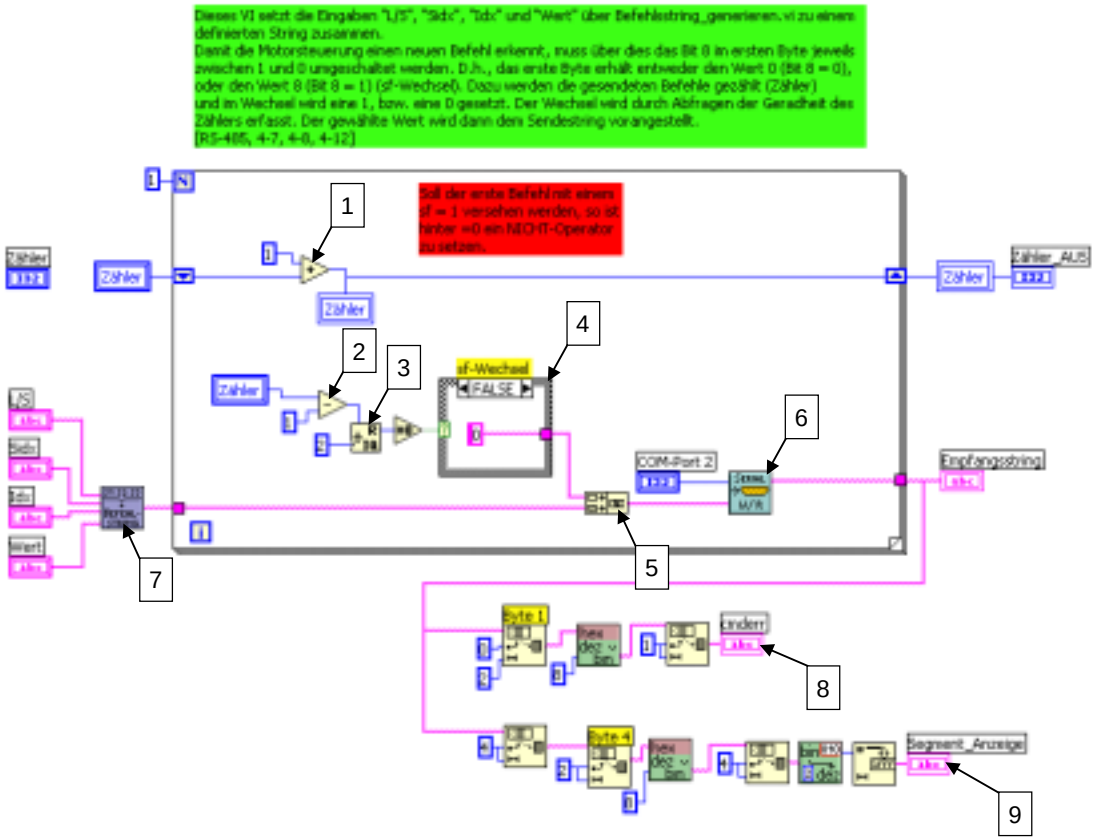


Abbildung 9.1: Steuerung für den Bit-Wechsel:
Auszug aus dem Sub-VI Befehlsstring_an_TLC_senden_XXXXXX_TGK.vi.

Der eingehende Zählerwert wird inkrementiert (1) und in die lokale Variable „Zähler“ geschrieben. Zur Untersuchung, ob der eingehende Zähler gerade oder ungerade ist (3), wird die Inkrementierung wieder rückgängig gemacht (2). In der Case-Anweisung (4) wird dann bei geradem Zähler eine „0“ bei ungeradem eine „8“ generiert und als erstes Zeichen vor den übrigen Teil des Kommandos gestellt (5). Diese nachfolgenden Zeichen wurden zuvor in dem Sub-VI (7) zusammengestellt (s. Abbildung 9.2), wofür vier Eingaben notwendig sind:

1. Die Information, ob ein Wert gelesen oder geschrieben werden soll,
2. der Index des Parameters,
3. der Subindex des Parameters,
4. der zu übergebende Wert.

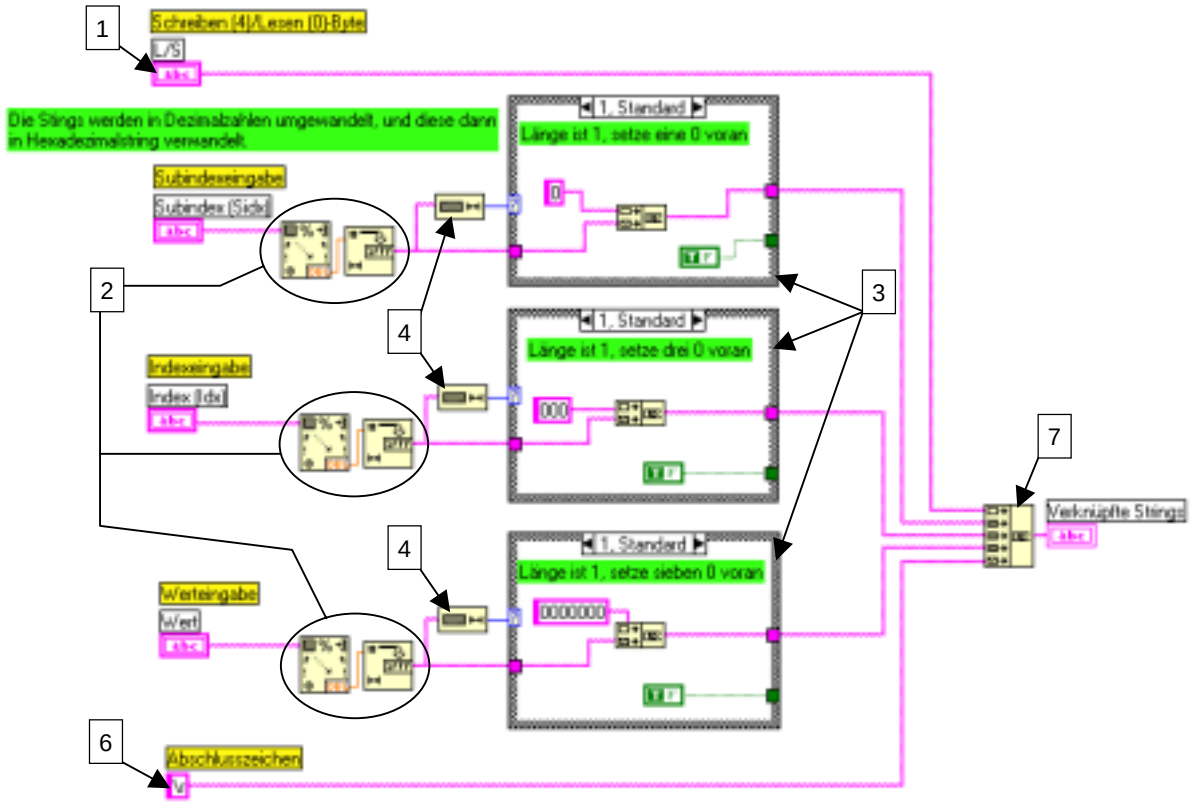


Abbildung 9.2: Blockdiagramm zur Generierung der Kommandozeichenkette: Auszug aus dem Sub-VI Befehlsstring_generieren_XXXXXX_TGK.vi.

Ein Schreibbefehl wird durch eine „4“ und ein Lesebefehl durch eine „0“ an zweiter Stelle in der Zeichenkette gekennzeichnet. Diese Zeichen werden direkt übergeben (1). Bei den übrigen drei Größen sind zunächst Umformungen in das hexadezimale Format notwendig ((2) in Abbildung 9.2). Jede Eingabe erstreckt sich im Kommando über eine festgelegte Anzahl von Bytes. Je Byte sind zwei Zeichen vorgesehen.

Eingabe	Byteanzahl	Zeichen
requestdata	*1*	*2*
Index	2	4
Subindex	1	2
Wert	4	8
Summe		16

Tabelle 9.3: Byte- und Zeichenanzahl der Kommandozeichenkette: Die Zeichen des „request“-Bytes wurden schon behandelt (vgl. Abschnitt 9.3.1).

Enthält eine Eingabe weniger Zeichen als erforderlich, werden die restlichen Stellen in den Case-Anweisungen (3) mit Nullen aufgefüllt, wie es in Tabelle 9.4 verdeutlicht wird.

Index	Ist-Länge	Solllänge	Index der Übergabe
28	2	4	**00**28

Tabelle 9.4: Beispiel für die Gestaltung des Kommando-Indexes, die vorangestellten Nullen sind fett gedruckt.

Nachdem allen Kommandoteilen die richtige Länge zugewiesen wurde, werden sie zu einer Zeichenkette verknüpft (7). Bei diesem letzten Schritt der Kommandoerstellung wird außerdem das Abschlusszeichen als siebzehntes Zeichen angefügt. Wie aus Abschnitt 7.2.4 bekannt ist, wird an dieser Stelle ein „carriage return“ erwartet. In LabVIEW entspricht dies einem „\r“. Dieses Abschlusszeichen wurde als Stringkonstante hinzugefügt (6). Bei seiner Eingabe ist zu beachten, dass in LabVIEW zwischen einer „Normalen“ Anzeige und einer „’\’ Code-Anzeige“ unterschieden wird. Normalerweise werden Zeichenketten in der normalen Anzeige eingegeben, die Eingabe von „\r“ erscheint wie in Abbildung 9.3 a).

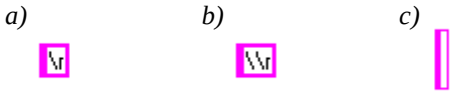


Abbildung 9.3: Darstellung der Eingabe eines Steuerzeichens unter LabVIEW, Hinweis nach [28]: a) Eingabe und Darstellung als String in der normalen Anzeige, b) Darstellung der Eingabe von a) in der“ ,\’ Code Anzeige“, c) Darstellung b) in der normalen Anzeige nachdem eines der beiden Backslash-Zeichen („\“) entfernt wurde.

In der „’\’ Code-Anzeige“, wechselt die Darstellung zu der in Abbildung 9.3 b). Durch den zusätzlichen Backslash wird die Eingabe von „\r“ nicht mehr als Steuerzeichen, sondern als normaler Text behandelt. Indem einer der beiden Backslashs gelöscht wird, erhält man das gewünschte Steuerzeichen. Abbildung 9.3 c) stellt es in der normalen Anzeige dar.
Mit dem Anfügen dieses Abschlusszeichens ist die Kommandozeichenkette fertig und kann an die Positioniersteuerung gesendet werden (6) (Abbildung 9.1).

9.3.3 Auswertung von Empfangsdaten

Nach dem Senden des Kommandos wird über das Sub-IV (6) (Abbildung 9.1) auch die Antwort eingelesen.
Für die Auswertung der Empfangsdaten wird die in Abschnitt 7.2.1.2 aufgeführte Einteilung in Bytegruppen ausgenutzt. Am Beispiel der Messfahrt soll dies erläutert werden. Die Messfahrt des Drehkanals entspricht einer Punkt zu Punkt-Fahrt („PTP“-Fahrt). Dabei fährt die Steuerung eine absolute Position an. Der Befehl für eine „PTP“-Fahrt wird solange übersandt,

bis die Steuerung den Übergang in diese Betriebsart quittiert hat, ab dann wird nur noch durch Statusabfragen das Erreichen der Sollposition überwacht. Die Steuerung befindet sich in der „PTP“-Positionierung, wenn die Bitcodierung des „controldata“-Bits im Byte 2 den Wert „3“ (7) ergibt. Die Bearbeitung und damit die Fahrt wird gestartet, wenn das Bit 14 („x_end“) in den Bytes 3 und 4 („fb-statusword“) eine „0“ anzeigt (8).

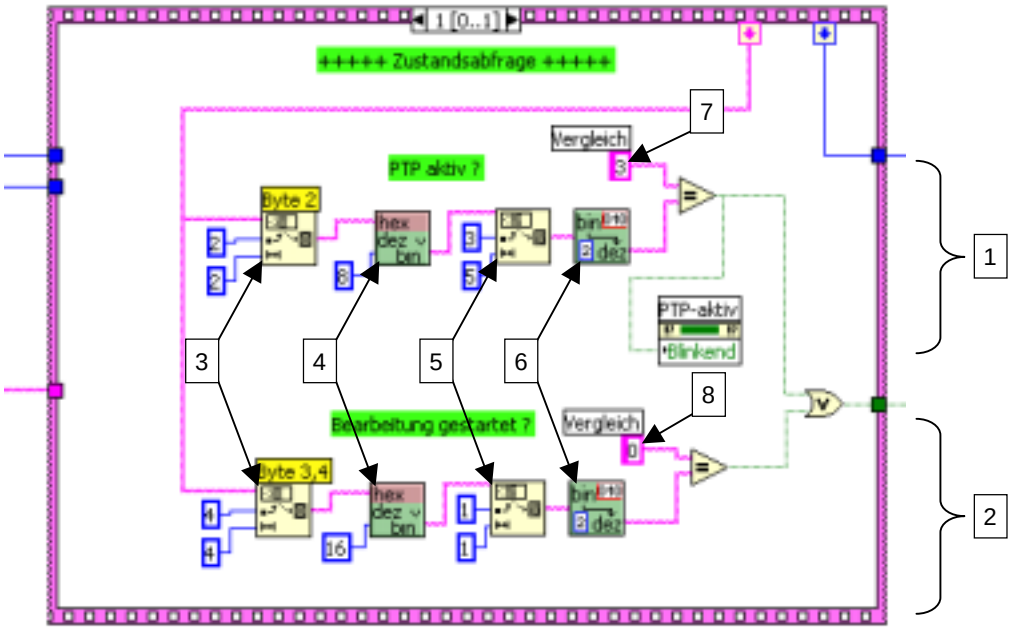


Abbildung 9.4: Sequenz [4-3-3-0-1]:
Es wird die Betriebsart (1) und das Erreichen der Sollposition (2) abgefragt.

Zunächst werden die Bytes aus den Empfangsdaten herausgelesen, in denen die gesuchte Information steht (3). Die extrahierten Hexadezimalzahlen werden dann in die Binärschreibweise überführt (4). Aus der Binärschreibweise werden einzelne Bits entnommen (5), um sie für den Vergleich mit dem erwarteten Wert (7, 8) in eine Dezimalzahl umzuwandeln (6). An dieser Stelle ist zu bemerken, dass in der binären Schreibweise die Bits von rechts nach links aufgestellt und gezählt werden, beginnend mit dem Zählindex „0“. Im Programm liegen diese Zeichen allerdings als Zeichenkette vor und werden daher von links nach rechts gezählt. Auch hier beginnt der Zählindex bei „0“ (Tabelle 9.5).

7	6	5	4	3	2	1	0	Bit-Zählung binär
1	**1**	**0**	**0**	**1**	**0**	**1**	**0**	Binärzahl
0	1	2	3	4	5	6	7	Zeichenzählung

Tabelle 9.5: Verdeutlichung der verschiedenen Zählweisen.

Um beispielweise die Betriebsart zu ermitteln, müssen die Bits 0 bis 4 des zweiten Bytes entschlüsselt werden. Das bedeutet, dass aus der Zeichenkette die Zeichen 3 bis 7 zu entnehmen sind (5).
Generell muss zunächst für die Antwortauswertung auf der Byteebene eine Auswahl getroffen werden (3). Die nachfolgenden Umformungen hängen von der gewünschten Information ab.

9.3.4 Kommandos senden und Antworten lesen

Die Kommandos werden mit dem Sub-VI Befehlsstring_an_TLC_senden-_XXXXXX_TGK.vi an die Positioniersteuerung gesendet. Dabei muss der Befehlszähler von einem Sub-VI zum nächsten übergeben werden, wodurch eine sequenzielle Verknüpfung entsteht, die gewährt, dass die Kommandos nacheinander gesendet werden. Das erste VI dieser Kette benötigt einen Startwert des Zählers (1).

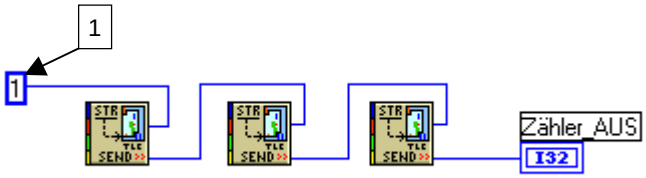


Abbildung 9.5: Aneinanderreihung der Sub-VIs: Befehlsstring_an_TLC_senden_XXXXXX_TGK.vi.

Im Blockdiagramm dieses Sub-VIs (Abbildung 9.1, S. 90) befindet sich das Sub-VI Seriell_Schreiben_Lesen_XXXXXX_TGK.vi (6). In ihm wird das Kommando über die serielle Schnittstelle an die Positioniersteuerung gesendet. Zwischen dem Schreiben des Befehls und dem Lesen der Antwort wird eine Dauer von 0,08 Sekunden gewartet. Dieser Wert wurde empirisch ermittelt.

9.4 Betrachtung wesentlicher Programmpunkte

Dieser Abschnitt beschreibt die programmiertechnische Umsetzung wesentlicher Programmabschnitte.

9.4.1 Das Frontpanel

Die Bedienung des Mess- und Steuerprogramms erfolgt über das Frontpanel (Abbildung 9.6).

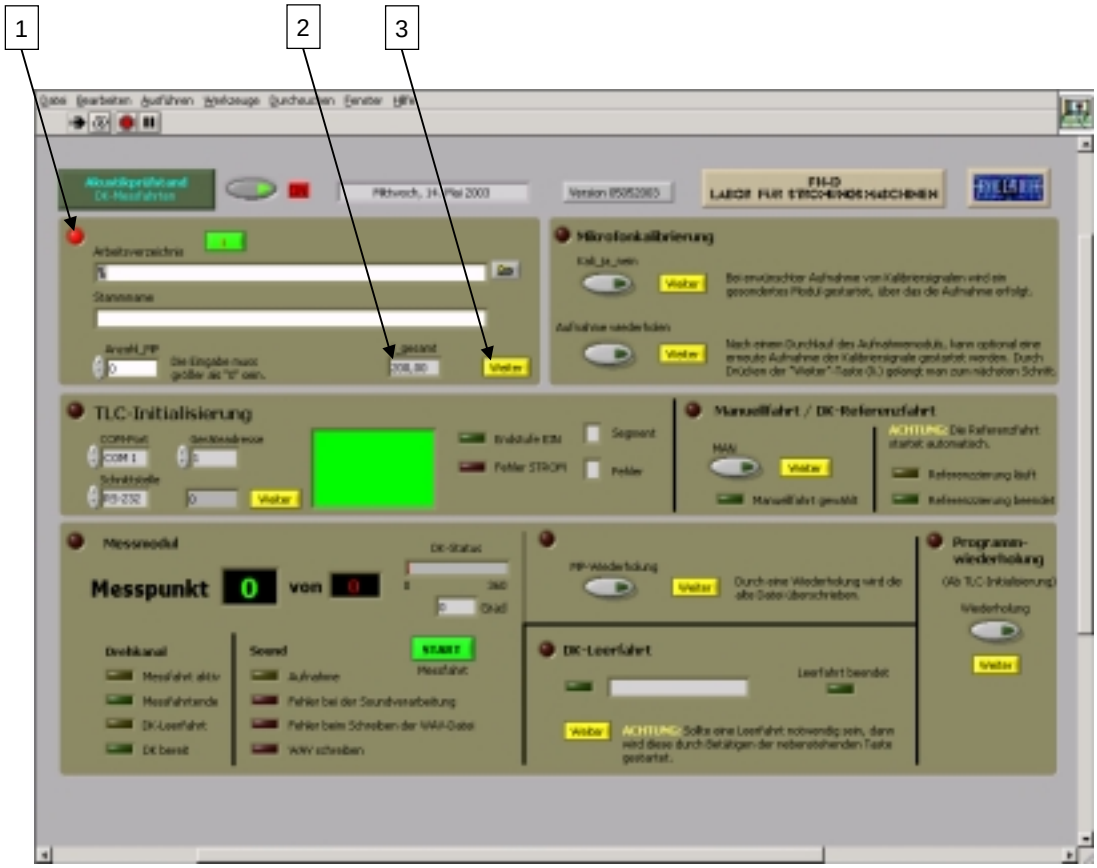


Abbildung 9.6: Frontpanel zur Bedienung des Mess- und Steuerprogramms.

Das Programm wird Schritt für Schritt, entsprechend der Sequenzstruktur, abgearbeitet. Jeder Schritt wird durch eine Benutzereingabe beendet (gelbe „Weiter“-Tasten (3)) und durch eine leuchtende Lampe markiert (runde rote Lampen (1)).

9.4.2 TLC-Initialisierung

Im dritten Schritt der Programmbedienung wird die Positioniersteuerung initialisiert (Sequenz [3-0]). Da die Steuerung auch über die Schnittstellenerweiterungskarte ansprechbar ist, wurden die COM-Ports 1 bis 8 berücksichtigt. Der gewählte Port wird für die Kommunikation wie folgt konfiguriert:

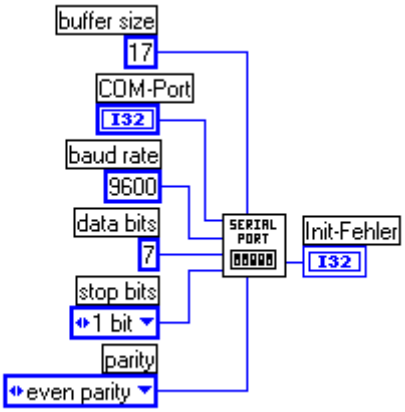


Abbildung 9.7: Konfiguration des COM-Ports.

Bei der Eingabe der Puffergröße ist das Abschlusszeichen als siebzehntes Zeichen mit zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 7.2.4). Je nachdem über welche Schnittstelle die Positioniersteuerung angesteuert wird (RS232 oder RS485), sind nach Hersteller unterschiedliche Adressierungsstrings zu senden. Das Gerät trägt standardmäßig die Adresse 1, theoretisch können Adressen von 1 bis 21 im EEPROM eingestellt werden. Bei der Adressierung über die RS232-Schnittstelle sind der Adressnummer X zehn Doppelkreuze („#“) voranzustellen, bei Verwendung der RS485-Schnittstelle nur eins, jedoch muss die Adressnummer hier zweistellig sein (z.B. „#01“). Tests haben gezeigt, dass es sinnvoll ist, die Adressierung mindestens dreimal in Folge durchzuführen, daher enthält die Schleife zwei Wiederholungen. Sollte dennoch keine Adressierung zustande kommen wird der Adressierungsschritt nochmals von vorne wiederholt. Bei gelungener Adressierung sendet die Steuerung ihre Adresse in der Form „#XX“, bzw. „#X“, wieder zurück.

Bevor anschließend die Endstufe der Steuerung eingeschaltet wird, wird über eine Statusabfrage der Betriebszustand der Steuerung abgefragt. Dies geschieht mit dem Sub-VI Segmentelement_TLC_auslesen_XXXXXX_TGK.vi in der Sequenz [4-0-0]. Die „cos“-Bits enthalten bitcodiert den Inhalt der Sieben-Segmentanzeige der Steuerung. Die Abfrage erfolgt so lange wie einer der folgenden drei Zustände vorliegt:

Anzeige	Zustand
4	Endstufe ist ausgeschaltet
6	Endstufe ist eingeschaltet
7	Es liegt ein Quick-Stopp vor

Tabelle 9.6: Betriebszustände der Steuerung, bei denen das Programm fortfährt.

Ist die Endstufe bereits eingeschaltet (Anzeige = „6“), geschieht nichts weiter. Sie wird eingeschaltet, wenn sie dies noch nicht ist (Anzeige = „4“). Liegt ein Quickstopp vor, so wird dieser quittiert, bis der Zustand auf „4“ oder „6“ wechselt. Das bedeutet, dass die Ursache für den Quick-Stopp manuell beseitigt werden muss. Beispielsweise kann es passieren, das einer der Taster aktiviert ist. Dieser wäre dann zunächst durch den entsprechenden Schalter zu überbrücken, um die Positioniersteuerung ansprechbar zu machen. Danach wird die Endstufe eingeschaltet. Das erfolgreiche Einschalten ist an der Anzeige „6“ in der Anzeige „Segement“ (Abbildung 9.6) erkennbar. Anschließend werden an der Positioniersteuerung Voreinstellungen vorgenommen:

Größe	Wert	Einheit
Motorbeschleunigung	200	U/(min·s)
Motorverzögerung	200	U/(min·s)
Sicherheitsabstand von der Schaltkante	80000	inc
Endschaltersuchdrehzahl	120	min^{-1}
Ausfahrdrehzahl (aus dem Schaltbereich)	60	min^{-1}
Messfahrtdrehzahl	200	min^{-1}

Tabelle 9.7: Voreinstellungen an der Steuerung.

Die Angaben beziehen sich auf eine Gesamtübersetzung von 200 : 1. Damit bei den Messfahrten stets eine Umdrehung des Drehkanals pro Minute vollzogen wird, wurde die Messfahrtdrehzahl mit der Gesamtübersetzung des Antriebsstranges gekoppelt. Die übrigen Werte wären ebenfalls mit der Übersetzung zu koppeln, jedoch können sie für die beiden Prüfstände, mit Übersetzungen von 200 : 1 (FH) und etwa 154 : 1 (Pollrich), bestehen bleiben.
Bei Anpassungen der Vorgaben sind ganzzahlige Werte zu gewähren.

9.4.3 Angaben zum Drehkanal

Eine wichtige Eingabe ist die Gesamtübersetzung des Antriebsstranges des Drehkanals, weil davon, wie oben erwähnt, u.a. die Messdauer abhängt. Außerdem findet im Programmablauf eine absolute Drehkanalpositionierung statt. Dabei wird der Drehkanal ausgehend von einem Referenzpunkt auf bestimmte Winkelpositionen gefahren. Dies geschieht, indem der Steuerung die Anzahl der Motorinkremente mitgeteilt wird, um die sich der Motor drehen soll. Je nach Übersetzung sind für eine volle Drehkanalumdrehung mehr oder weniger Inkremente notwendig. Aus diesen Gründen wird zu Beginn des Programms in der Sequenz [0] die Übersetzung als Konstante eingegeben (Abbildung 9.8).

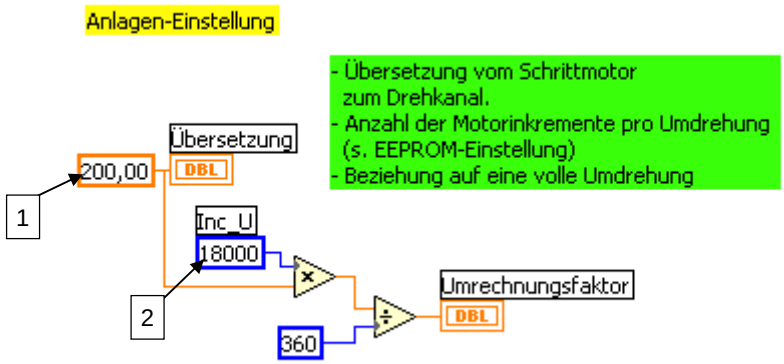


Abbildung 9.8: Algorithmus zur Berechnung des Umrechnungsfaktors:
Es müssen die Übersetzung (1) und die Motorinkrementanzahl pro Umdrehung (2) eingegeben werden.

Der in Abbildung 9.8 abgebildete Algorithmus berechnet aus den Informationen der Übersetzung und der Motorinkremente pro Motorumdrehung einen Umrechnungsfaktor. Mit diesem Faktor kann eine gewünschte Winkelstellung des Drehkanals in eine Anzahl von Motorinkrementen umgerechnet werden. Die Motorinkrementanzahl für eine Umdrehung ist im EEPROM der Steuerung gespeichert (vgl.Abschnitt 6.3).
Die Liste der Voreinstellungen ist beliebig erweiterbar, dazu sind der Sequenz [4-0-2] entsprechend weitere Sequenzen hinzuzufügen.

9.4.4 Drehkanalpositionierung

Die Programmabschnitte zur Drehkanalpositionierung, wie der Referenzzierung, der Messfahrt und der Leerfahrt, weisen den gleichen Ablauf auf. Zunächst wird der Befehl für die jeweilige Bewegung solange an die Steuerung gesendet, bis diese den Start der Befehlsumsetzung zurückgemeldet hat. Danach wird wiederholt eine Statusabfrage durchgeführt, gefolgt von einer Auswertung der Antworten (vgl. Abschnitt 9.3.3), bis die gewünschte Position erreicht ist.

9.4.4.1 Referenzzierung

Die Drehkanalreferenzzierung bewegt den Drehkanal vor jeder Messreihe in eine reproduzierbare Ausgangsposition. Dazu wird der Befehl für die Referenzfahrt auf den Endschalter der negativen Drehrichtung gesendet (Sequenz [4-2]). Nach Erreichen des Endschalters fährt der Drehkanal aus dem Tastbereich in entgegengesetzter Richtung heraus und erweitert den

Abstand zur Schaltkante um weitere, in den Voreinstellungen vorgegebene, Inkremente (Sicherheitsabstand in Tabelle 9.7). Die eingenommene Position ist die absolute „0“-Position.

9.4.4.2 Messfahrt

Bei der Messfahrt wird der Drehkanal absolut positioniert. Dabei werden abwechselnd die Positionen bei 0° und 360° angefahren. Über einen Zähler, der mit jeder Messfahrt inkrementiert wird, wird entschieden werden, auf welche Position der Drehkanal zu drehen ist. Über den Umrechnungsfaktor (Abschnitt 9.4.3) wird der anzufahrende Winkel in die für die Bewegung benötigte Motorinkrementanzahl umgerechnet.

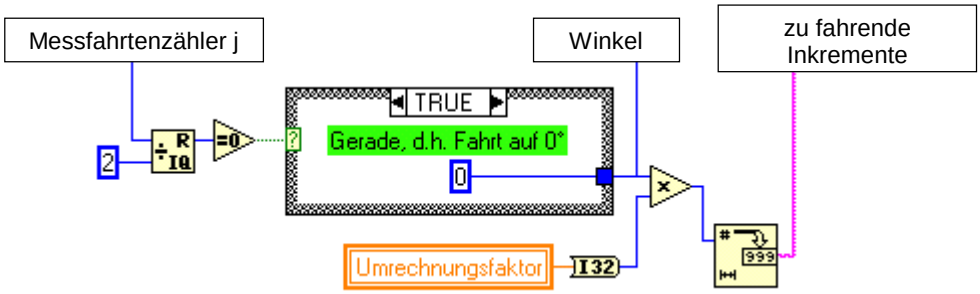


Abbildung 9.9: Algorithmus zur Entscheidung über die Drehrichtung und zur Berechnung der zu fahrenden Inkremente.

Der Algorithmus in Abbildung 9.9 gibt für einen ungeraden Zähler die Drehkanalpositionierung auf 360°, bei geradem Zähler auf 0° vor. Abbildung 9.10 zeigt das Sub-VI Befehlsstring_an_TLC_senden_XXXXXX_TGK mit den Parametern für die absolute Positionierung, unter denen auch die berechneten Inkremente nach Abbildung 9.9 enthalten sind.

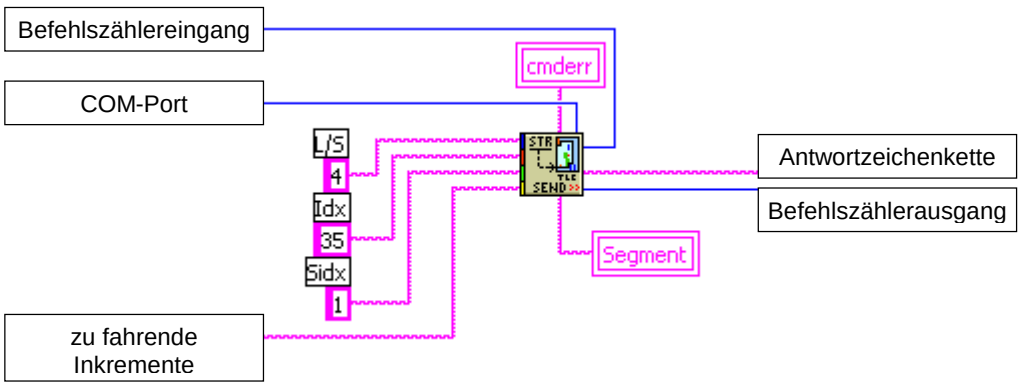


Abbildung 9.10: Eingänge des Sub-VIs Befehlsstring_an_TLC_senden_XXXXXX_TGK.vi zur absoluten Positionierung des Drehkanals um die eingegebenen Inkrementanzahl.

9.4.4.3 Leerfahrt

Die Leerfahrt entspricht einer Messfahrt ohne paralleler Aufzeichnung akustischer Signale.
Ob eine Leerfahrt notwendig ist, wird ebenfalls über den Messfahrtenzähler j bestimmt. Bei einem ungeraden Wert befindet sich der Drehkanal noch in der 360°-Position und muss zurückgeholt werden. Es erfolgt die Positionierung gemäß Abbildung 9.10 auf die absolute „0“-Position durch Übergabe des Wertes „0“ für die Inkremente.
Die Leerfahrt wird mit einer höheren Motordrehzahl gefahren als die Messfahrt, nämlich mit 350 min^{-1}.

9.4.5 Manuellfahrt

Die Manuellfahrt wurde in einem eigenen VI (Drehkanal_Manuellfahrt_XXXXXX_TGK) untergebracht und ist eigenständig lauffähig. Um mit dem Drehkanal arbeiten zu können, müssen jedoch die Schritte der TLC-Initialisierung durchlaufen sein, diese sind nicht im VI enthalten. Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Drehkanalpositionierungen erfolgt die Manuellfahrt nicht durch absolute Positionierungen sondern über spezielle Kommandos der Steuerung für die Manuellfahrt. Je nachdem welcher Wert übermittelt wird, erfolgt eine Manuellfahrt in negativer oder positiver Drehrichtung, zudem kann über den Wert auch zwischen zwei Motordrehzahlen gewählt werden.
In dem Sub-VI wurden Einstellungen für eine langsame und schnelle Manuellfahrt eingebunden, für die langsame Fahrt 60 min^{-1} und für die schnelle Fahrt 180 min^{-1}. Des Weiteren wurde auch die Möglichkeit vorgesehen, die Drehgeschwindigkeiten durch Eingaben in den Feldern (2) und (3) (Abbildung 9.11) zu variieren. Werden keine Werte vorgegeben, wird automatisch eine „0“ gesetzt, dann gelten die oben erwähnten Standardwerte. Die aktuelle Drehgeschwindigkeit wird in den Anzeigen (7) und (8) dargestellt. Über den Wahlschalter (1) kann zwischen der langsamen und schnellen Fahrt umgeschaltet werden. Eine Lampe (9) signalisiert durch Leuchten, dass die schnelle Fahrt gewählt ist.

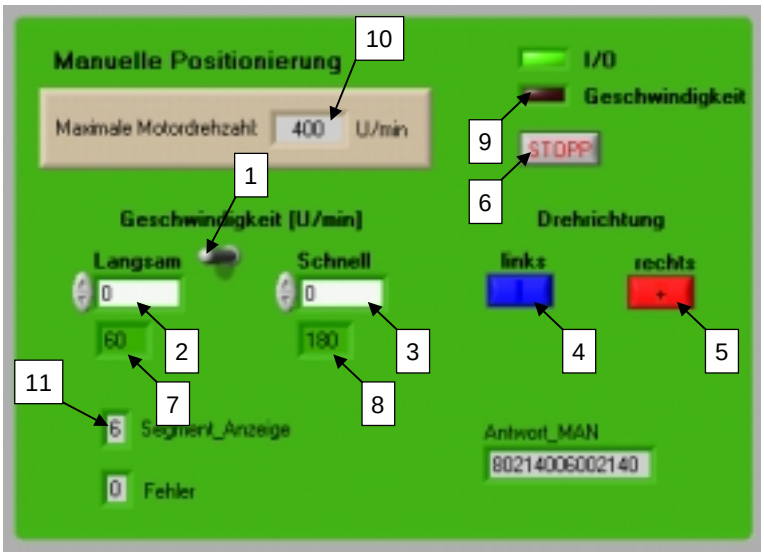


Abbildung 9.11: Frontpanel des VI zur Manuellfahrt.

Da sich der komplette Ablauf in einer While-Schleife befindet, die über den „Stopp“-Schalter beendet wird, können die Geschwindigkeitseinstellungen jeder Zeit umgestellt werden. Zum Schutz der Anlage wurde die Drehzahleingabe begrenzt. In dem VI wurde die maximale Motordrehzahl n_{max} als Konstante eingefügt, deren Wert unter (10) angezeigt wird. Die eingetragenen Geschwindigkeitswerte werden erst weitergegeben, wenn sie in dem Intervall von 0 bis n_{max} liegen. Abbildung 9.12 zeigt diese Kontrollschleife für die Eingabe der schnellen Drehgeschwindigkeit. In der Case-Anweisung (1) findet schließlich die Umformung der Zahl in eine Zeichenkette statt, um diesen Wert an die Steuerung senden zu können. Wird eine Geschwindigkeit von „0“ eingegeben, übergibt die Case-Anweisung die Standardeinstellung von 60, bzw. 180 min^{-1}. Durch die Übergabe an die Positioniersteuerung werden die im EEPROM gespeicherten Werte für die Zeitdauer der Steuerungsnutzung ersetzt. Ein Aus- und Einschalten der 24 V-Versorgung ruft wieder die Werte aus dem EEPROM in den Speicher der Positioniersteuerung.

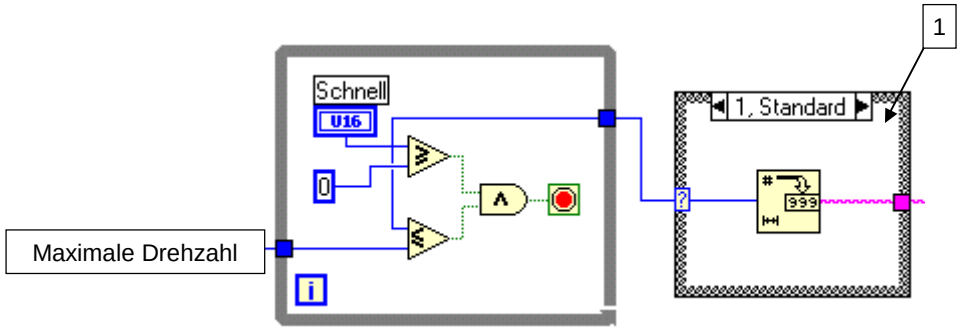


Abbildung 9.12: Kontrollschleife.

Bei der Übergabe des Kommandos zur Manuellfahrt, werden die Informationen über die Geschwindigkeit (schnell oder langsam) und die Drehrichtung bitcodiert übergeben. Zu betrachten sind hier die Bytes 7 und 8, weil der Parameterwert vom Datentyp UINT 16 ist (Abschnitt 7.2.1.1). Die Drehgeschwindigkeit wird im Bit 2 codiert. Für eine positive Motordrehung muss das Bit 0, für eine negative Motordrehung das Bit 1 auf den Wert „1“ gesetzt werden. Die Orientierung der Motordrehung verdeutlicht Abbildung 9.13.

Bewegung	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Wert
langsam in negative Richtung	0	1	0	2
langsam in positive Richtung	0	0	1	1
schnell in negative Richtung	1	1	0	6
schnell in positive Richtung	1	0	1	5

Tabelle 9.8: Bitcodierung der Manuellfahrtinformation.

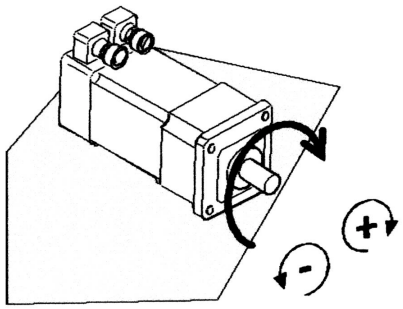


Abbildung 9.13: Visualisierung der positiven und negativen Motordrehrichtung positiv = rechts, negativ = links.

Da die Anzahl der möglichen Bewegungszustände überschaubar ist, konnte im Programm eine Formulierung auf der Bitebene wie in Tabelle 9.8 umgangen werden. Zur Generierung des Übergabewertes wurde eine Addition eingeführt. Aus Tabelle 9.8 sind die endgültigen Werte für die Übergabe zu ersehen. Diese lassen sich aus einer Addition bestimmen. In die Addition geht für eine langsame Fahrt der Wert „0“, für eine schnelle Fahrt der Wert „4“ (Bit 2 = 1) ein. Da die Drehrichtung durch Setzen der Bits 1 und 0 vorgegeben wird, heißt dies, dass eine negative Drehung eine „2“ und eine positive Drehung eine „1“ erfordert. Eine schnelle Drehung in negativer Richtung erfordert also den Wert 6 (4 + 2 + 0). Die Additionssequenz zeigt Abbildung 9.14.

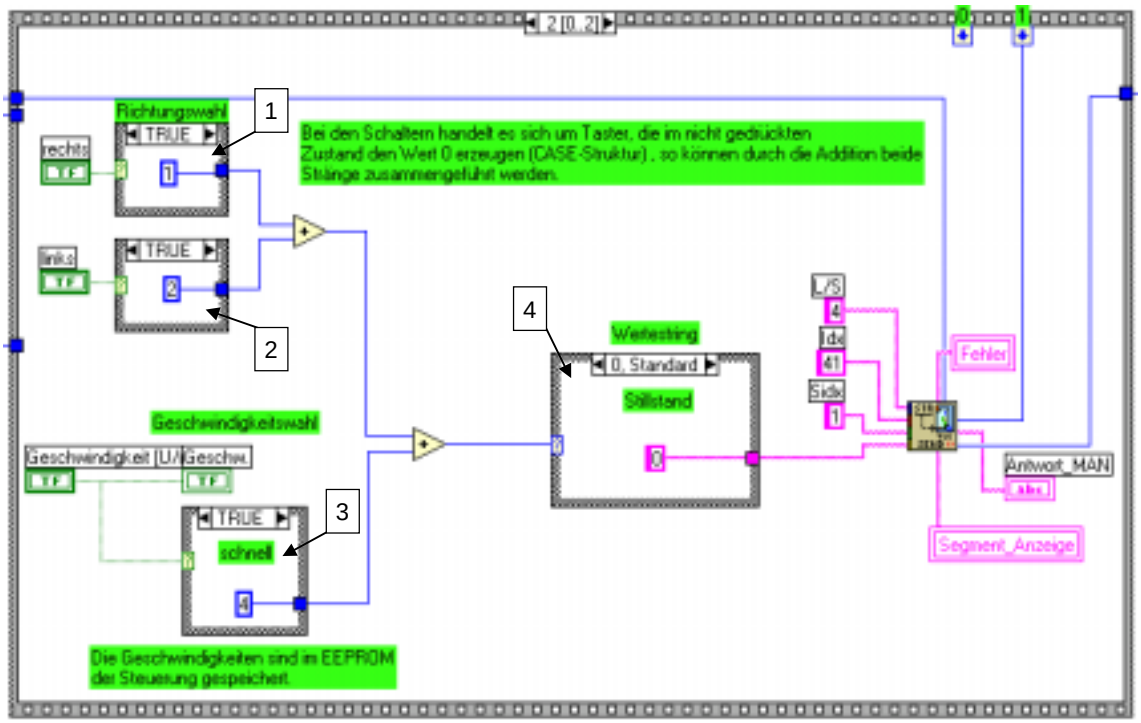


Abbildung 9.14: Additionssequenz zur Formulierung des Kommandowertes der Manuellfahrt.

Die Eingänge der Case-Anweisungen (1) und (2) sind mit den Tastern (4) und (5) in Abbildung 9.11 verbunden, so dass nur eine Anweisung einen „True“-Wert erhalten kann. Im Falle eines „False“-Wertes übergeben sie den Wert „0“. Die Case-Anweisung (3) erhält ihren Eingangswert über den Wahlschalter (1) (in Abbildung 9.11). Auch sie übergibt den Wert „0“ im Falle eines „False“-Wertes am Eingang. Der Summand gelangt in die Case-Anweisung (4), wo er in eine Zeichenkette umgewandelt wird und schließlich als Wert des Kommandos an die Positionssteuerung gesendet wird. Die Case-Anweisung (4) reagiert nur auf die Eingangswerte 0, 1, 2, 5 und 6. Tritt ein anderer Wert auf, wird der Standardfall abgearbeitet, der hier auf den Fall „0“ gelegt wurde. Werden die Taster (4) und (5) (Abbildung 9.11) nicht betätigt, soll sich der Drehkanal auch nicht drehen. In diesem Fall, ergibt der Summand den Wert „0“ oder „4“. Der Wert „4“ wird in der Case-Anweisung (4) nicht vorgesehen, in diesem Fall wird der Standardfall bearbeitet („0“) und somit richtiger Weise eine „0“ übergeben. Nach Betätigen der „Stopp“-Taste ((6) in Abbildung 9.11) wird das VI zur Manuellfahrt beendet. Während der Manuellfahrt kann es passieren, dass durch eine Endschalterbetätigung der Drehkanal stehen bleibt und die Anzeige (11) (Abbildung 9.11) eine „7“ anzeigt. In diesem Fall ist es möglich, den Drehkanal in die entgegengesetzte Richtung aus dem Taster-bereich herauszufahren.

9.4.6 Soundkartenkonfiguration

Die Soundkarte wird vor jeder Aufnahme neu konfiguriert und nach Abschluss der Aufnahme geschlossen. Damit wird vermieden, dass Reste der Aufnahme i im Puffer verweilen und fälschlicher Weise bei der nachfolgenden Aufnahme i + 1 mit aufgenommen werden. Dies war ein Ergebnis der Auswertungen der ersten akustischen Messungen am Drehkanal (vgl. Abschnitt 15.4.2). Die Struktur der Konfiguration (Abbildung 9.15) ist stets die gleiche, lediglich bei der Puffergröße werden Unterschiede gemacht.

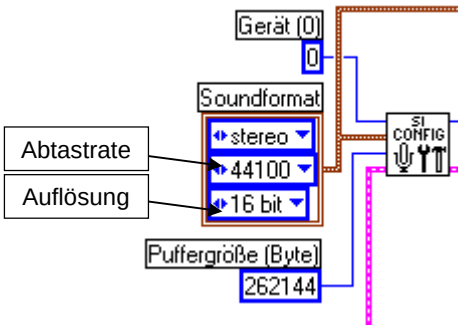


Abbildung 9.15: Konfiguration der Soundkarte.

Die Größe des Puffers konnte nicht als feste Größe von vornherein in das Programm eingehen, da es maßgeblich von der Auslastung des PC-Systems abhängt, welche Größe sinnvoll ist. Während der Versuche trat mehrfach das Problem auf, dass die eingelesenen Daten nicht schnell genug in den Puffer geschrieben werden konnten, die Folge war ein Programmstopp und den Verlust der gerade aufgenommenen Daten. Abhilfe schaffte hier eine Erhöhung des Pufferwertes. Der aktuelle Pufferwert von 262144 (= 2^{18}) wurde bei einem Testlauf des Steuerprogramms zusammen mit dem in der parallel laufenden Diplomarbeit [29] erstellten Messdatenerfassungsprogramm für aerodynamische Messungen empirisch ermittelt. Für die Aufnahme der Kalibrierdaten konnte ein kleinerer Wert verwendet werden (131072 = 2^{17}), weil die Aufnahmedauer geringer ist. Außerdem wird durch einen zu großen Pufferwert die Aktualisierungsrate des Zeitdiagramms reduziert.

9.4.7 Dateispeicherung

Auch dieser Schritt erfolgt stets nach dem gleichen Prinzip.

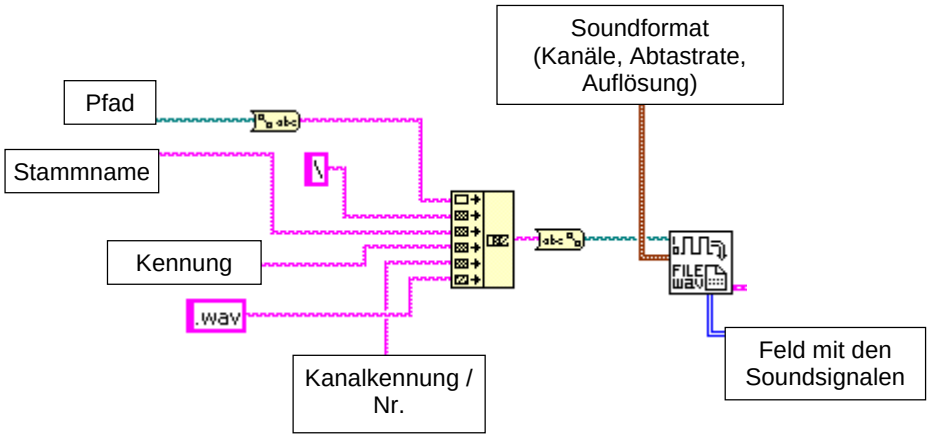


Abbildung 9.16: Schreiben der WAV-Datei.

Abbildung 9.16 zeigt den Ausschnitt aus dem Blockdiagramm zur Speicherung des Feldes mit den Soundsignalen als WAV-Datei in dem angezeigten Format. Der Pfad und der Stammname bleiben während einer Messreihe konstant. Die beiden anderen Werte ändern sich je nach Art der Datei:

Datei enthält	Kennung	Kanalkennung / Nr.
Kalibriersignale	„_KALI”	„_li“ oder „_re“
Messdaten von Messfahrten	„_MP“	fortlaufende Nummer
Messdaten aus dem Drehkanalstillstand*	„_HOCH“	fortlaufende Nummer

*Tabelle 9.9: Bildung der Dateinamenskennung in Anhängigkeit der aufgenommenen Daten, * Aus den Programm DK_Stillstand_Aufnahme_XXXXXX.vi.*

9.4.8 Aufnahme der Kalibriersignale

Die eigentliche Kalibrierung findet im Verlauf einer Nachbereitung der Messdaten statt. Das beschriebene VI dient lediglich der Aufzeichnung der Kalibriersignale beider Kanäle. Das VI, das für die Aufnahme gestartet wird, ist auch unabhängig vom Mess- und Steuerprogramm lauffähig. In diesem Fall müssen das Verzeichnis und der Stammname vor dem Programmstart eingegeben werden ((6) und (7) in Abbildung 9.17).

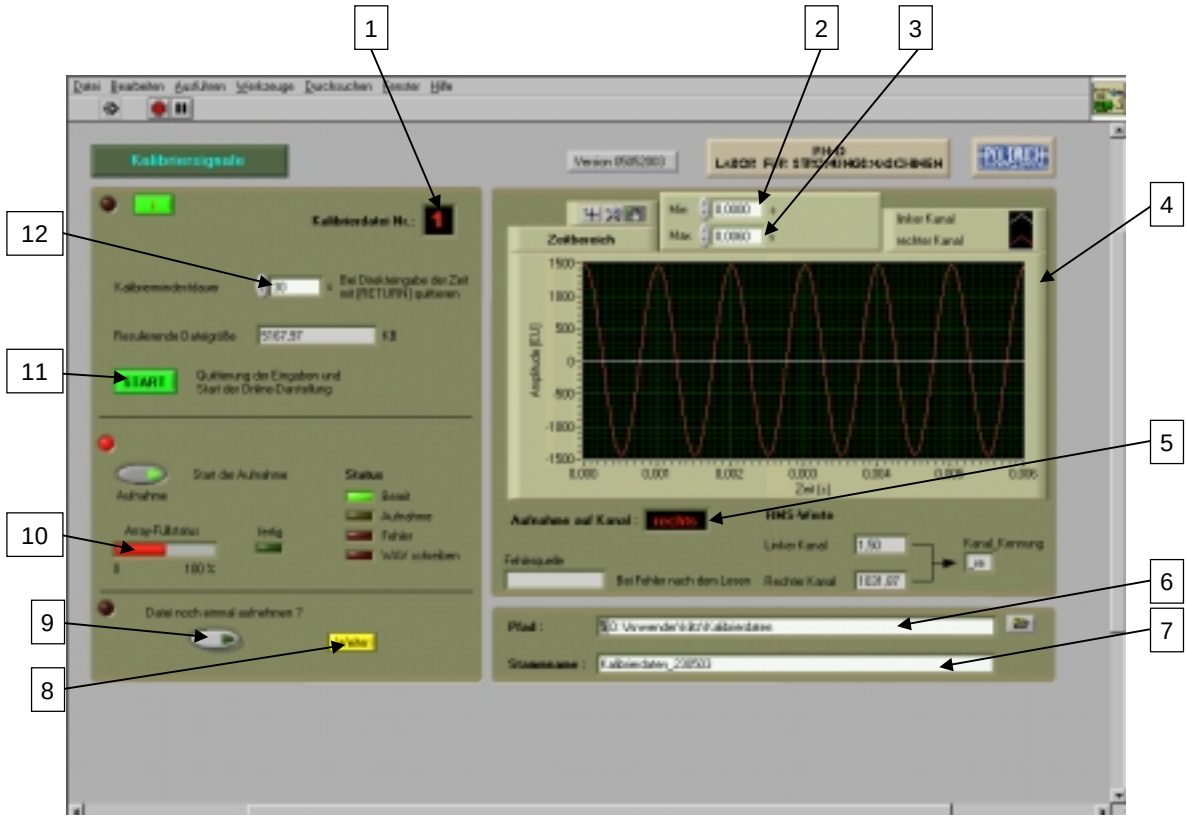


Abbildung 9.17: Frontpanel der Subroutine zur Aufnahme der Kalibriersignale: Die Abbildung zeigt den Zustand, in dem am rechten Kanal ein Signal anliegt.

Aus der eingegebenen Aufnahmedauer wird nach folgender Gleichung die Dateigröße bestimmt:

$$\text{Dateigröße}\,[\text{KB}] = \frac{t_{\text{Aufnamhe}} \cdot f_{ab} \cdot n_K \cdot n_{bit}}{8192\,\frac{\text{bit}}{\text{KB}}} \qquad (9.1)$$

$t_{Aufnahme}$ Aufnahmedauer [s]
f_{ab} Abtastrate [Hz]
n_K Anzahl der Kanäle, bei Stereo = 2
n_{bit} Auflösung in Bit-Angabe

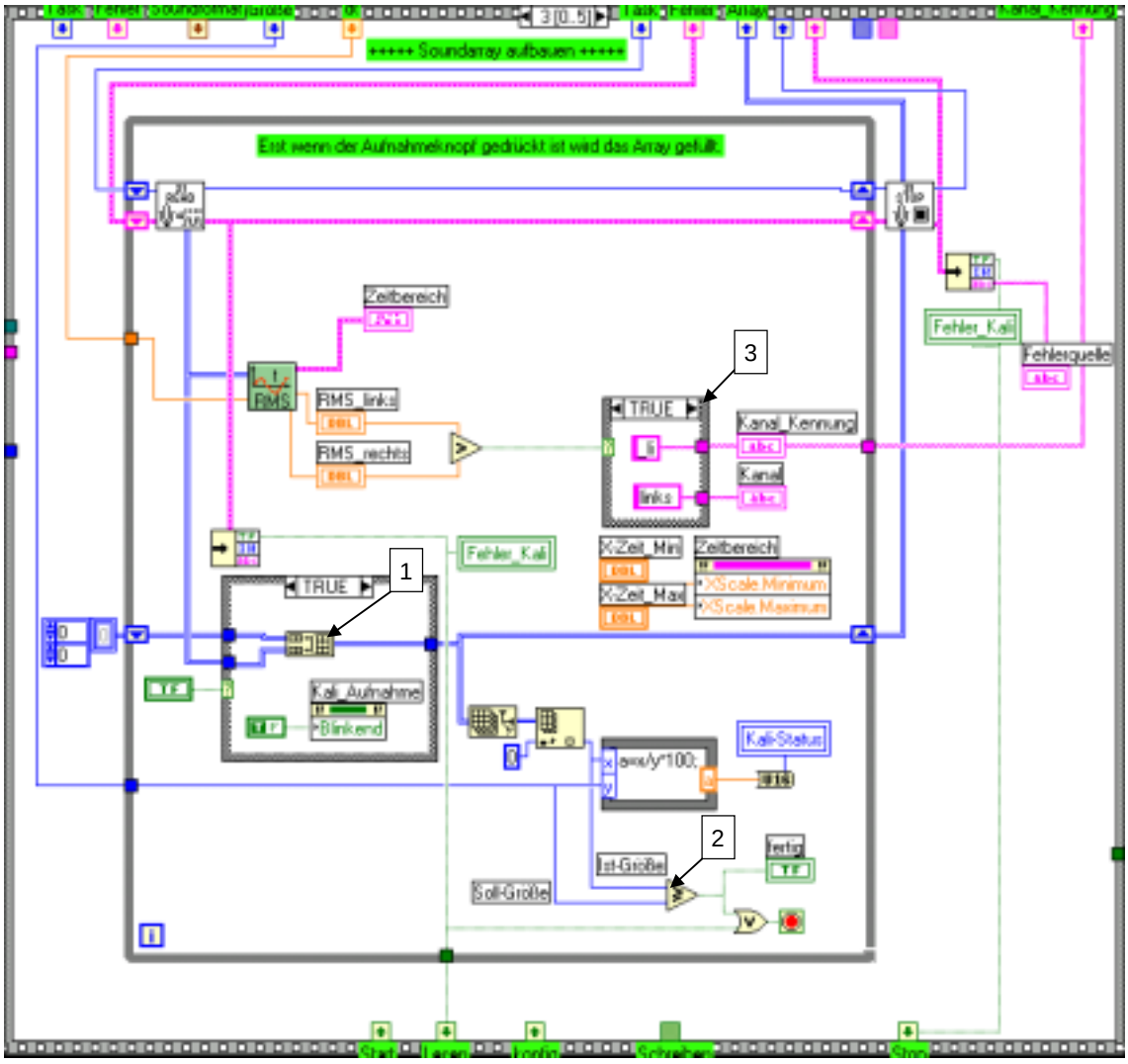


Abbildung 9.18: Aufnahmeschleife des Sub-VIs Kalibriersignal_aufnehmen_2_Mikrofone_XXXXXX_TGK.vi.

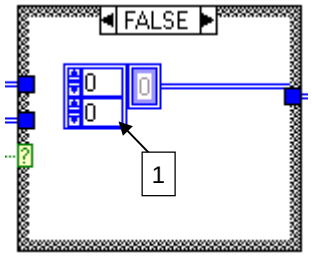


Abbildung 9.19: Ersetzen der eingelesenen Soundsignale durch ein leeres Feld (1).

Parallel zur Darstellung im Zeitbereich wird auch der Effektivwert der Signale beider Kanäle berechnet und angezeigt (Abbildung 9.17). Anhand eines Vergleiches beider Effektivwerte, kann das Programm selbstständig entscheiden, über welchen Kanal gerade Kalibriersignale aufgezeichnet werden und fügt dementsprechend die „Kanal“-Erweiterung „_re“ oder „_li“ dem Dateinamen hinzu ((3) in Abbildung 9.18). Solange die Signale nur angezeigt werden,

werden die eingelesenen Sounddaten durch ein leeres Feld ersetzt (Abbildung 9.19). Erst nachdem der Schalter „Aufnahme“ aktiviert wurde, startet die eigentliche Aufnahme. Dann werden die eingelesenen Werte ständig an ein bestehendes Feld angefügt ((1) in Abbildung 9.18). Die Aufnahme erfolgt solange bis die Istgröße des Feldes mit der Sollgröße übereinstimmt oder diese gerade übersteigt ((2) in Abbildung 9.18), deshalb ist die eingegebene Aufnahmedauer auch als Mindestaufnahmedauer zu betrachten. Visuell ist der Aufnahmefortschritt an einem Statusbalken zu überwachen ((9) in Abbildung 9.17). Nach der Aufnahme wird das gesamte Feld in einer WAV-Datei abgelegt (Abbildung 9.16).

10 Berechnung der Terzspektren

Aus den aufgenommenen WAV-Dateien kann neben eines Schmalbandspektrums auch ein Oktav- bzw. ein Terzspektrum berechnet werden. Im Vergleich zum Schmalbandspektrum werden bei diesen beiden Spektren Frequenzbänder definierter Breite aufsummiert, die jeweils durch eine sogenannte Mittenfrequenz festgelegt sind. Die Berechnungsgrundlagen sind in der DIN EN 61260 [12] zu finden.
An diesem Punkt ist darauf hinzuweisen, dass im Zusammenhang mit den Terz- und Oktavspektren deutlich zwischen den Nenn-Bandmittenfrequenzen (nach DIN) und den exakten Bandmittenfrequenzen zu unterscheiden ist. Die Berechnungen werden stets mit den exakten Frequenzen durchgeführt. Wird im Folgenden von Terzmittenfrequenzen geredet, so sind die exakten Bandmittenfrequenzen gemeint. Die Nenn-Bandmittenfrequenzen dienen lediglich der Bezeichnung der Filterbänder, sie ergeben sich durch Runden der exakten Bandmittenfrequenzen.

10.1 Berechnung der Terzmittenfrequenzen und der Bandeckfrequenzen

Die Betrachtung der Filter geht von den Oktavbandfiltern aus. So werden nach der Norm [12] ein Bandsystem zur Basis 10 und eines zur Basis 2 zugelassen. Die Ausführungen hier beschränken sich auf das bevorzugte System zur Basis 10.
Für die Oktavbänder zur Basis 10 gilt für das Verhältnis zweier benachbarter Oktavmittenfrequenzen folgendes Oktav-Verhältnis:

$$G_{10} = \frac{f_{Om(i+1)}}{f_{Om(i)}} = 10^{\frac{3}{10}} \qquad (10.1)$$

Zur Realisierung von Bandfiltern mit einer vom Oktavband abweichenden Auflösung wird die Bandbreitenkennzahl 1/b eingeführt, mit der der Bruchteil eines Oktavbandes gekennzeichnet wird. Beispielsweise ist für ein Oktavbandfilter b gleich 1, bei einem Terzbandfilter hingegen, bei dem ein Oktavband in drei Teilbänder aufgeteilt wird, ist b gleich 3.
Die Berechnung der exakten Mittenfrequenzen f_m geht von der Referenzfrequenz f_r (= 1000 Hz) aus. Je nachdem ob der Nenner der Bandbreitenkennzahl (b) gerade oder ungerade ist, greift eine der folgenden Gleichungen zur Bestimmung der Mittenfrequenzen:

$$b\begin{cases} \text{ungerade}: f_m = \left(G^{\frac{x}{b}}\right)\cdot f_r & (10.2) \\ \text{gerade}: f_m = \left(G^{\frac{2x+1}{2b}}\right)\cdot f_r & (10.3) \end{cases}$$

Da b bei einem Terzbandfilter ungerade ist, entfällt eine Betrachtung von Gleichung (10.3). Die Variable x ist einer Zählvariablen gleichzusetzen. Sie zählt die Mittenfrequenzen von f_r ausgehend ganzzahlig, wobei gilt:

$$x\begin{cases} > 0, \text{ für } f_m > f_r \\ < 0, \text{ für } f_m < f_r \end{cases}$$

Mit Hilfe der Bandmittenfrequenzen f_m werden dann die Bandeckfrequenzen f_1 und f_2 berechnet:

$$f_1 = \left(G_{10}^{-\frac{1}{2b}}\right)\cdot f_m \quad (10.4)$$

$$f_2 = \left(G_{10}^{+\frac{1}{2b}}\right)\cdot f_m \quad (10.5)$$

Bei der Beschränkung auf Terzbandfilter, können die Beziehungen aus den obigen Gleichungen, ausgehend von folgenden Bedingungen, vereinfacht werden:

$$G_{10} = 10^{\frac{3}{10}}$$

$$b = 3$$

$$x_i = [a, ..., -2, -1, 0, 1, 2, ..., b]$$

a die negative Anzahl von Bändern unterhalb von 1000 Hz
b die positive Anzahl von Bändern oberhalb von 1000 Hz

Das Verhältnis zweier benachbarter Terzmittenfrequenzen lautet dann:

$$\frac{f_{m(i+1)}}{f_{m(i)}} = \frac{\left(G_{10}^{\frac{x_{(i+1)}}{b}}\right)\cdot f_r}{\left(G_{10}^{\frac{x_{(i)}}{b}}\right)\cdot f_r} = G_{10}^{\frac{x_{(i+1)}-x_{(i)}}{b}} = \left(10^{\frac{3}{10}}\right)^{\frac{x_{(i+1)}-x_{(i)}}{3}} = 10^{\frac{x_{(i+1)}-x_{(i)}}{10}} = 10^{\frac{1}{10}} = \sqrt[10]{10} \quad (10.6)$$

Für die Bestimmung der Mittenfrequenzen aus den Bandeckfrequenzen ergeben sich folgende Faktoren:

$$\frac{f_1}{f_m} = \frac{\left(G_{10}^{-\frac{1}{2b}}\right) \cdot f_m}{f_m} = \left(10^{\frac{3}{10}}\right)^{-\frac{1}{2 \cdot 3}} = 10^{-\frac{1}{20}} = \frac{1}{\sqrt[20]{10}} \qquad (10.7)$$

$$\frac{f_2}{f_m} = \frac{\left(G_{10}^{+\frac{1}{2b}}\right) \cdot f_m}{f_m} = \left(10^{\frac{3}{10}}\right)^{+\frac{1}{2 \cdot 3}} = 10^{+\frac{1}{20}} = \sqrt[20]{10} \qquad (10.8)$$

Aus Gleichung (10.6) geht ein konstantes Verhältnis zweier benachbarter Mittenfrequenzen hervor. Dies kennzeichnet die Reihe der Mittenfrequenzen als geometrische Reihe mit dem Stufensprung $q = \sqrt[10]{10}$, also als Normzahlenreihe R10. Die Bildung der Reihenglieder beginnt jeweils mit dem ersten Element einer Dekade. Nach den Gleichungen (10.7) und (10.8) findet sich der Stufensprung auch in den Verhältnissen der Bandeckfrequenzen zu deren Mittenfrequenzen wieder. Die Berechnung der Bandeckfrequenzen kann daher mit den folgenden beiden Gleichungen erfolgen:

$$f_1 = f_m \cdot \frac{1}{\sqrt{q}} \qquad (10.9)$$

$$f_2 = f_m \cdot \sqrt{q} \qquad (10.10)$$

10.2 Berechnung der Terzspektren aus diskreten Werten

Bei der Berechnung der Terzspektren aus diskreten Werten ist darauf zu achten, die Frequenzlinien den jeweiligen Terzbändern eindeutig zuzuweisen. Dabei dienen die Bandeckfrequenzen jeweils als untere und obere Grenze für ein Terzband. Ein Terzband muss im Rahmen der Frequenzauflösung komplett aufgefüllt werden. Dies ist gewährleistet, wenn der Abstand der ersten Frequenzlinie zu f_1 und der letzten Frequenzlinie zu f_2 stets kleiner oder maximal gleich der Frequenzauflösung ist. Ist der Abstand gleich der Frequenzauflösung, dann befindet sich der Vorgänger oder der Nachfolger der jeweiligen Frequenzlinie auf f_1 oder f_2. In diesem Fall muss die Terzbandzuweisung der Linien eindeutig sein. Die Frequenzlinien, die auf f_1 oder f_2 liegen, dürfen nur in einem Terzband berücksichtigt werden, da sonst die Signalenergie verfälscht würde.

Daher wird an dieser Stelle folgende Regel nach [26] aufgestellt:

Die Frequenzlinie $a_{(i)}$ bei der Frequenz $f_{(i)}$ wird dem Terzband mit der Nennmittenfrequenz $f_{mn(k)}$ zugeordnet, wenn gilt:

$$f_{1(k)} \leq f_{(i)} < f_{2(k)} \qquad (10.11)$$

$f_{1(k)}$ und $f_{2(k)}$ sind die Bandeckfrequenzen des Terzbandes mit der Nennmittenfrequenz $f_{mn(k)}$.

Zur Berechnung des Terzspektrums werden in dem MATLAB-Programm Wav_Analyse_Programm_auto.m die Gleichungen (10.6), (10.9), (10.10) und (10.11) verwendet. Der Quelltext des Programms findet sich im Anhang 20.15.2.

11 Analysatorenvergleich

Zur Verifizierung der Berechnungsroutine für Terzspektren im MATLAB-Programm Wav_Analyse-_Programm_auto.m wurde das Kalibriersignal des Akustikkalibrators aufgezeichnet (1000 Hz, 94 dB). Das Terzspektrum dieses Signals wurde mit den folgenden Systemen erstellt:

- HP-Analysator
- PAK-System
- PC-System (Soundkarte und MATLAB-Programm)
- B & K-Analysator

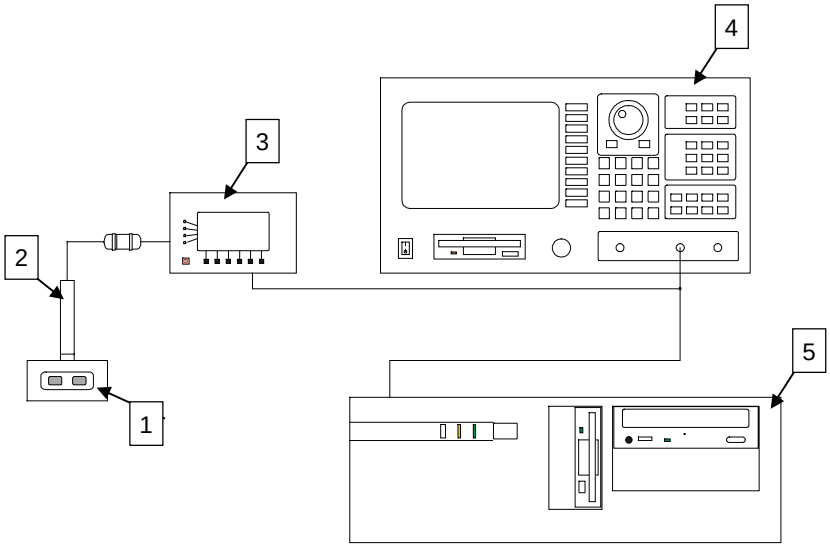


Abbildung 11.1: Skizze des Messaufbaus:
1: Akustikkalibrator der Firma B & K, 2: Messmikrofon mit Vorverstärker der Firma B & K
3: Verstärker der Firma B & K, 4: HP-Analysator, 5: PC mit Soundkarte.

Das Signal wurde zeitgleich mit dem HP-Analysator und der Soundkarte erfasst. Die Messung am PAK-System geschah zu einem abweichenden Zeitpunkt und ohne parallel über die Soundkarte zu messen. Abbildung 11.2 zeigt die drei Frequenzspektren im Vergleich. Die Frequenzspanne wurde der des HP-Analysators angepasst, sie erstreckte sich bei den einzelnen Systemen über folgende Bereiche:

- HP-Analysator: 0 Hz bis 3200 Hz ($\Delta f = 4$ Hz)
- PAK-System: 0 Hz bis 12800 Hz ($\Delta f = 4$ Hz)
- PC-Soundkarte: 0 Hz bis 17224 Hz ($\Delta f = 1{,}3458$ Hz)

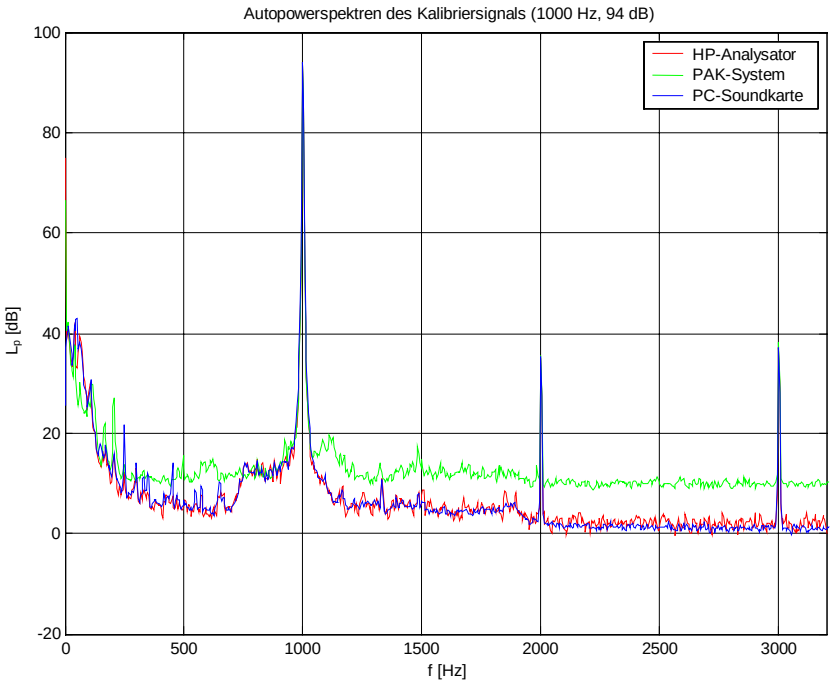


Abbildung 11.2. Vergleich der Autopowerspektren der drei Systeme, die Frequenzauflösung beträgt bei allen Spektren 4 Hz. Dargestellt ist die Frequenzspanne des HP-Analysators.

Die in Abbildung 11.2 erkennbare Abweichung des Frequenzspektrums des PAK-Systems von den beiden anderen Spektren wurde nicht weiter verfolgt. Die Information, die aus dieser Betrachtung des Terzspektrums hervorgehen soll, wird von dieser Abweichung nicht berührt. Die Terzspektren in Abbildung 11.3 zeigen eine gute Übereinstimmung des Schalldruckpegels bei der Kalibrierfrequenz. In den Bereichen von 63 Hz bis 500 Hz und von 3150 Hz bis 10000 Hz weisen die Terzspektren des HP-Analysators und der Soundkarte ähnliche Verläufe auf. Die Abweichung des Terzspektrums des PAK-Systems ist auf die Differenz im Autopowerspektrum zurückzuführen. Auffällig sind die erhöhten Pegel im Terzspektrum des HP-Analysators (1) der Terzbänder von 630 Hz, 800 Hz, 1250 Hz und 1600 Hz. Die Terzspektren des PAK- und PC-Systems entsprechen in diesem Bereich den theoretischen Erwartungen und weisen deutlich niedrigere Pegelwerte auf.

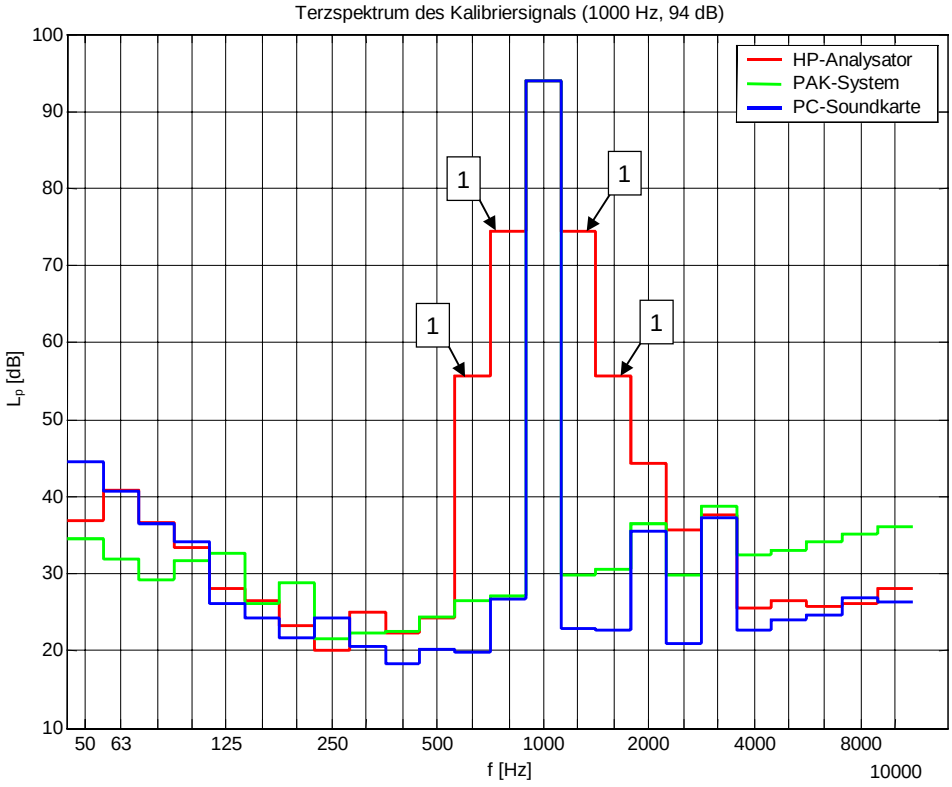


Abbildung 11.3: Vergleich der Terzspektren der drei Systeme:
Die einzelnen Schalldruckpegel und die Gesamtschalldruckpegel sind in Tabelle 11.1 aufgeführt.

Wie aus Abbildung 11.4 zu entnehmen ist, gibt es im Schmalbandspektrum des HP-Analysators keine Pegel in den jeweiligen Terzbandbereichen, die die Erhöhungen (1) in Abbildung 11.3 begründen würden.

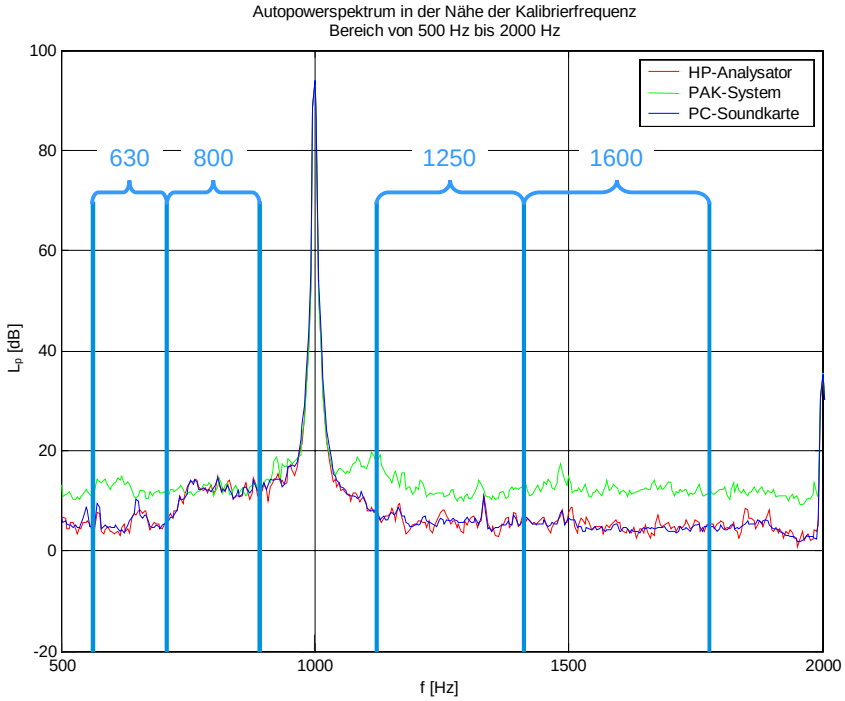


Abbildung 11.4: Darstellung des Bereiches in der Nähe der Kalibrierfrequenz: Die Frequenzbereiche der Terzbänder zu 630 Hz, 800 Hz, 1250 Hz und 1600 Hz sind zur Orientierung markiert (blaue Begrenzungen).

Aufgrund der Dominanz des Kalibriersignals im Frequenzspektrum (vgl. Abbildung 11.2), wird der Gesamtschalldruckpegel durch die erhöhten Terzpegel ((1) in (Abbildung 11.3)) in vernachlässigbarer Weise beeinflusst (Tabelle 11.1).

Die Analyse des Kalibriersignals wurde mit einem B & K-Analysator zum Vergleich nachempfunden (Messkette wie in Abbildung 11.1, jedoch ohne PC und Nexus-Verstärker und mit dem B & K-Analysators anstelle des HP-Analysators). Auch das von ihm angezeigte Terzspektrum wies deutlich erhöhte Schalldruckpegel der Terzbänder links und rechts neben dem Terzband von 1000 Hz auf und ähnelte damit der Anzeige des HP-Analysators. Beide Analysatoren arbeiten bei der Terzanalyse mit digitalen Filtern (vgl. [19] und [8]) . Das PAK-System und der PC jedoch berechnen die Terzspektren aus diskreten Werten. Dies erklärt die Ähnlichkeit der Ergebnisse der jeweiligen Systeme. Eine weitere Untersuchung dieses Sachverhaltes erfolgte im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht.

Dieser Sachverhalt unterstützt jedoch die Vorgehensweise, die Rohdaten der akustischen Messungen abzuspeichern und auf diese bei der Analyse zurückzugreifen.

[Hz] f_{mn}	[dB] $L_{p,HP}$	[dB] $L_{p,PAK}$	[dB] $L_{p,PC}$	
50	36,85	34,70	44,66	
63	40,87	31,90	40,70	
80	36,63	29,30	36,61	
100	33,55	31,70	34,20	
125	28,05	32,60	26,14	
160	26,47	26,10	24,33	
200	23,39	28,90	21,79	
250	20,07	21,50	24,30	
315	24,95	22,30	20,64	
400	22,28	22,50	18,31	
500	24,19	24,50	20,28	
630	55,68	26,50	19,92	
800	74,47	27,20	26,81	
1000	93,92	94,00	94,00	
1250	74,45	29,80	23,02	
1600	55,75	30,50	22,72	
2000	44,37	36,60	35,48	
2500	35,82	29,90	21,10	
3150	37,75	38,90	37,30	
4000	25,65	32,50	22,68	
5000	26,49	33,10	24,02	
6300	25,76	34,30	24,59	
8000	26,12	35,20	26,95	
10000	28,02	36,20	26,41	
	94,02	**94,00**	**94,00**	L_{pG}

Tabelle 11.1: Schalldruckpegel der einzelnen Terzbänder (50 Hz bis 10000 Hz), sowie der Gesamtschalldruckpegel L_{pG} des aufgeführten Bereiches jedes Terzspektrums.

Der in Tabelle 11.1 aufgeführte Gesamtpegel wurde wie folgt über den angegebenen Frequenzbereich ermittelt:

$$L_{pG} = 10 \cdot \log\left(\sum_{i=1}^{n} 10^{\frac{L_{pi}}{10}} \right) \qquad (11.1)$$

12 Mikrofonkalibrierung

Nach [11] wird empfohlen, die Messmikrofone jeweils vor und nach jeder Messreihe zu kalibrieren. Mindestens sind sie jedoch vor jeder Messreihe zu kalibrieren. Dabei ist es besonders wichtig, bei der Kalibrierung die gesamte während der eigentlichen Messung zur Anwendung kommenden Messkette zu berücksichtigen. Im Falle der akustischen Messung mit dem Drehkanal und dem Messprogramm wird von einer nachträglichen Kalibrierung des Systems ausgegangen, d.h. es werden vor Messbeginn die Kalibriersignale aufgezeichnet und es erfolgen dann die Messungen. Erst nachdem die Messreihe beendet ist, werden aus den Kalibriersignalen die Kalibrierfaktoren berechnet, die dann bei der Analyse der akustischen Messdaten angewendet werden. Dies macht noch einmal deutlich, warum die Kalibriersignale bei komplett angeschlossener Messkette aufgenommen werden müssen. Im Folgenden wird die Berechnung der Kalibrierfaktoren beschrieben, wie sie bei der Analyse der akustischen Messungen am Drehkanal, im Rahmen dieser Arbeit, durchgeführt wurde.
Es wird davon ausgegangen, dass die Kalibrierung mit einem der beiden nachfolgenden Signalen durchgeführt wird:

1. 1000 Hz mit 94 dB
2. 250 Hz mit 124 dB

Die Kalibriersignale liegen in Form von WAV-Dateien vor. Das MATLAB-Programm berechnet zunächst unter Anwendung des Flat-Top Fensters das lineare Autopowerspektrum. Anschließend sucht es in der Nähe von 250 Hz und 1000 Hz das Maximum im Autopowerspektrum. Anhand eines Vergleiches der beiden Maximalwerte wird festgestellt mit welchem der beiden Kalibriersignale kalibriert wurde. Damit steht der Sollschalldruckpegel fest (94 dB oder 124 dB).

12.1 Berechnung des Kalibrierfaktors

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit wurde für die Berechnung des Kalibrierfaktors nur ein Wert bzw. eine Amplitude aus dem Spektrum entnommen, nämlich der Maximalwert (vgl. oben). Der Kalibrierfaktor k korrigiert die gemessene Amplitude so, dass über die Berechnungsvorschrift für den Schalldruckpegel genau der erwartete Pegelwert ermittelt wird. Dazu wird er hier multiplikativ mit der Druckamplitude verknüpft:

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{\tilde{p} \cdot k}{\tilde{p}_0} \qquad (12.1)$$

$\tilde{p}$ gemessene Amplitude in [EU] (Engineering Units)
$\tilde{p}_0$ Bezugsschalldruck $\left(= 2 \cdot 10^{-5}\ \text{Pa}\right)$.
L_p Schalldruckpegel [dB]
Bei der Kalibrierung ist L_p der Kalibrierschalldruckpegel L_{pK}.

Aus Gleichung (12.2) ergibt sich dann die Bestimmungsgleichung für den Kalibrierfaktor k:

$$k = 10^{\frac{L_{pK}}{20}} \cdot \frac{\tilde{p}_0}{\tilde{p}} \qquad (12.2)$$

k Kalibrierfaktor [Pa/EU]

In Abbildung 12.1 ist ein Beispiel einer Programmausgabe nach Berechung der Kalibrierfaktoren zu sehen.

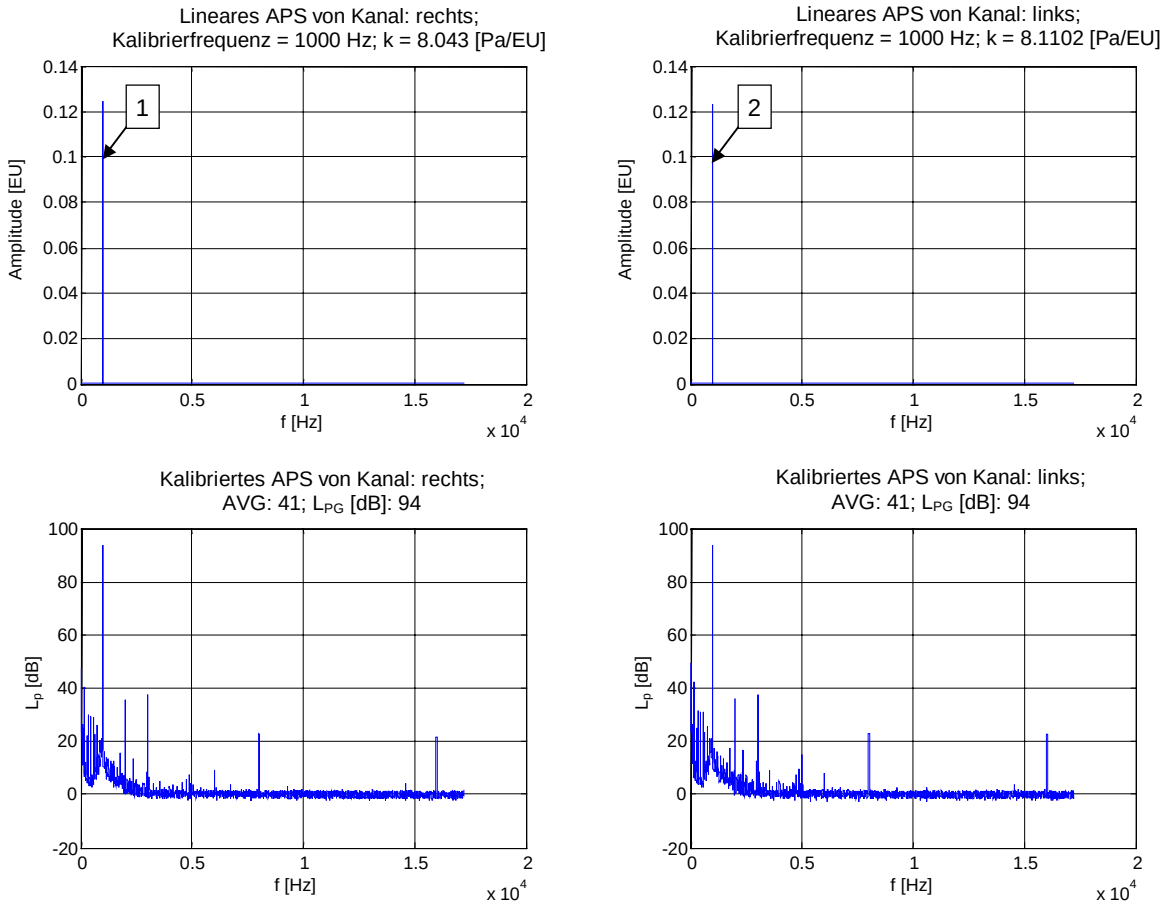


Abbildung 12.1: Ausgabe des MATLAB-Programms zur Berechnung des Kalibrierfaktors: Die oberen Diagramme zeigen die unkalibrierten linearen Autopowerspektren mit den Amplituden des Kalibriersignals ((1) und (2)), die unteren beiden die in dB skalierten kalibrierten Autopowerspektren.

Abbildung 12.1 zeigt, dass die ermittelten Kalibrierfaktoren (s. Überschrift der beiden oberen Diagramme in Abbildung 12.1) in der Anwendung auf das Kalibriersignal den richtigen Schalldruckpegel ergeben (s. Überschrift der unteren beiden Diagramme in Abbildung 12.1).

12.2 Verbesserte Berechnung des Kalibrierfaktors

Die beschriebene Berechnung des Kalibrierfaktors auf Grundlage nur eines Maximalwertes bildet keine optimale Lösung. In der Praxis ergibt das Kalibriersignal im Frequenzspektrum keine einzelne Linie. Die enthaltene Signalenergie wird, wie in Abbildung 12.2 dargestellt, auf mehrere Frequenzlinien verteilt. Der gezeigte Peak weist eine relativ breite Basis auf und seine Spitze wird hier durch mindestens drei Schalldruckpegelwerte beschrieben (1).

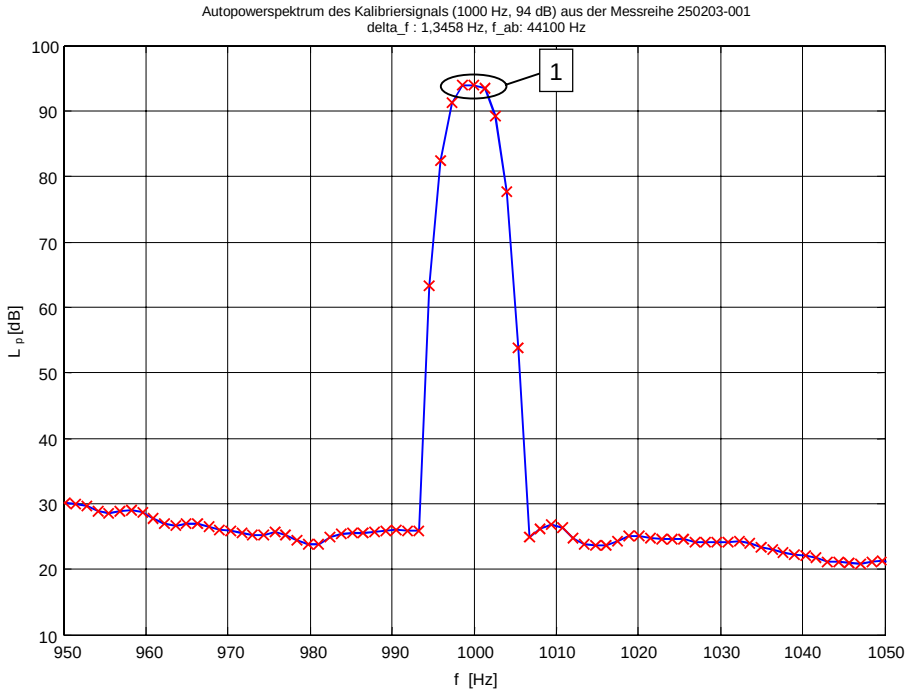


Abbildung 12.2: Verdeutlichung der Verteilung der Signalenergie auf mehrere Frequenzlinien: Dargestellt ist ein vergrößerter Ausschnitt aus dem Frequenzspektrum.

Aus diesem Grund ist es sinnvoller, anstelle eines Maximalwertes den Gesamtschalldruckpegel eines Frequenzbereiches für die Berechnung des Kalibrierfaktors heranzuziehen.

$$L_{pG} = 20 \cdot \log\left(\frac{GP}{\tilde{p}_0}\right) \qquad (12.3)$$

GP Gesamtpegel [Pa]

Der Gesamtpegel GP berechnet sich wie folgt [23]:

$$GP = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon} \cdot \sum_{i=1}^{N} A_i^2} \qquad (12.4)$$

ε Formfaktor des Bewertungsfensters
A_i Amplituden des Frequenzspektrums [EU]

Bindet man den Kalibrierfaktor k in die Gleichung (12.4) ein, ergibt sich zusammen mit Gleichung (12.3) folgende Formulierung für den Gesamtschalldruckpegel:

$$L_{pG} = 20 \cdot \log\left(\frac{\sqrt{\frac{1}{\varepsilon} \cdot \sum_{i=1}^{N} (A_i \cdot k)^2}}{\tilde{p}_0} \right) \qquad (12.5)$$

Aus dieser Formulierung lässt sich der Kalibrierfaktor bestimmen, wenn für den Gesamtschalldruckpegel L_{pG} der Kalibrierschalldruckpegel L_{pK} eingesetzt wird.

$$k = \frac{10^{\frac{L_{pK}}{20}} \cdot \tilde{p}_0}{\sqrt{\frac{1}{\varepsilon} \cdot \sum_{i=1}^{N} A_i^2}} = \frac{10^{\frac{L_{pK}}{20}} \cdot \tilde{p}_0}{GP} \qquad (12.6)$$

k Kalibrierfaktor [Pa/EU]
GP nach Gleichung (12.3)

13 Vergleich zwischen HP-Analysator und Soundkarte

Die akustischen Messungen an Ventilatoren sollen mit dem Drehkanal automatisiert werden. Dies schließt neben den mechanischen Bewegungen auch die Aufnahme der Signale ein, welche zur flexibleren Bearbeitung der Daten über eine Soundkarte erfolgen soll. Für Online-Analysen kann ein Analysator, hier ein HP-Analysator, in die Messkette integriert werden. Die Ergebnisse (z.B. Spektren) können abgespeichert werden. Diese Arbeitsweise schränkt die Flexibilität in der Auswertung deutlich ein, wenn ansonsten keine Zeitdaten mehr abgelegt werden. Der Einsatz des HP-Analysators setzt z.B. eine Festlegung der Frequenzauflösung voraus. Gerade hier zeigen sich die Vorteile einer Aufnahme über den PC. Die abgelegten Rohdaten können zu einem späteren Zeitpunkt zu Analysen wiederholt eingelesen werden. Dabei ist die Frequenzauflösung im Rahmen der Abtastrate beliebig einstellbar. Auch die Art der Analyse kann in einem gewissen Bereich frei gewählt werden. Je nachdem, ob schmalbandig oder in Terz- oder Oktavbändern analysiert werden soll. Da die Daten in einem gängigen Datenformat (WAV-Format) digital vorliegen, ist man in bezug auf das Auswertesystem weitgehend unabhängig.

Ein Problem bei der PC-Anwendung, im Zusammenhang mit den entwickelten LabVIEW-Programmen, ist die Online-Darstellung von Spektren. Die Berechnungen beanspruchen die CPU mitunter deutlich, vor allem wenn gleichzeitig aufgenommene Daten in einem Array für die Speicherung abgelegt werden müssen. Dieses Problem kann umgangen werden, wenn entweder zwei PCs parallel arbeiten, einer zur Online-Auswertung, der andere zur Datenakquirierung, oder durch einen parallel zum aufnehmenden PC angeschlossenen Analysator. Die letzte Variante wurde bei den Messreihen zu dieser Ausarbeitung umgesetzt. Auf diese Weise ist es zudem möglich, die PC-Auswertung der Signale mit denen des Analysators zu vergleichen und zu beurteilen.

Die Auswertungen dieser Arbeit stützen sich alleine auf die aufgenommenen Signale. Gerade deshalb ist eine Aussage über die Qualität der PC-Analyse im Vergleich zu der Ausgabe des HP-Analysators wichtig. Dieser Vergleich wird im Folgenden durchgeführt.

Aus der Diplomarbeit von Hr. Eggert [15] ist bekannt, dass sich die verwendete Soundkarte für akustische Messungen eignet. Neben der Soundkarte können jedoch die Messkette und abweichende Einstellungen der Hardware die Ergebnisse deutlich beeinflussen. Als relevante Hardwareeinstellung ist hier die Line-In-Aussteuerung zu nennen, die in der Windowsumgebung durchgeführt wird.

13.1 Line-In-Aussteuerung

Die Software der verwendeten Terratec-Soundkarte und die Windowsumgebung lassen eine Einstellung der Line-In-Aussteuerung zu. Beide Regelmöglichkeiten sind miteinander verknüpft, so dass die Einstellung eines Reglers ausreicht. Um den Einfluss der Einstellungen zu analysieren wurde das Kalibriersignal eines Akustikkalibrators (1000 Hz, 94 dB) über die Soundkarte aufgezeichnet. Parallel dazu wurde das Frequenzspektrum mit dem HP-Analysator erfasst.

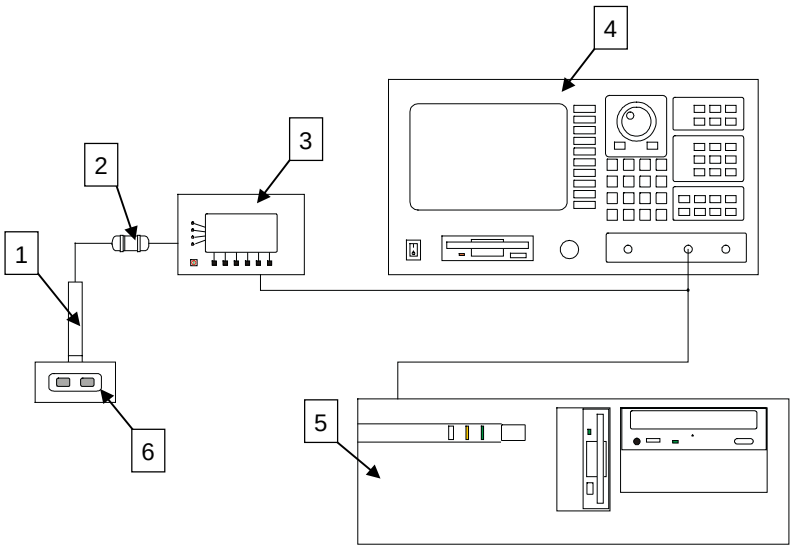


Abbildung 13.1: Skizze der Messkette für die Aufnahme des Kalibriersignals (Legende s. Tabelle 13.1).

Legende zu Abbildung 13.1			
1	B&K Mikrofon mit Vorverstärker	4	HP-Analysator
2	Steckeradapter von 7-pol. B&K-Steckersystem auf das LEMO-System	5	PC mit eingebauter Soundkarte und dem Steuerungs- und Messprogramm
3	Nexus Signalkonditionierer	6	B&K-Akustikkalibrator (1000 Hz, 94 dB)

Tabelle 13.1: Legende zu Abbildung 13.1.

Die Aussteuerung der Soundkarte ist manuell durchzuführen, dabei verfügt sie bei der maximalen Aussteuerungseinstellung über eine Dynamik von 96 dB. Im Gegensatz dazu besitzt der HP-Analysator eine Dynamik von 72 dB [19], zudem ist bei ihm eine automatische Aussteuerung möglich („Autorange“).

Um die Spektren miteinander vergleichen zu können, wurde die Frequenzauflösung des HP-Analysators zugrunde gelegt.

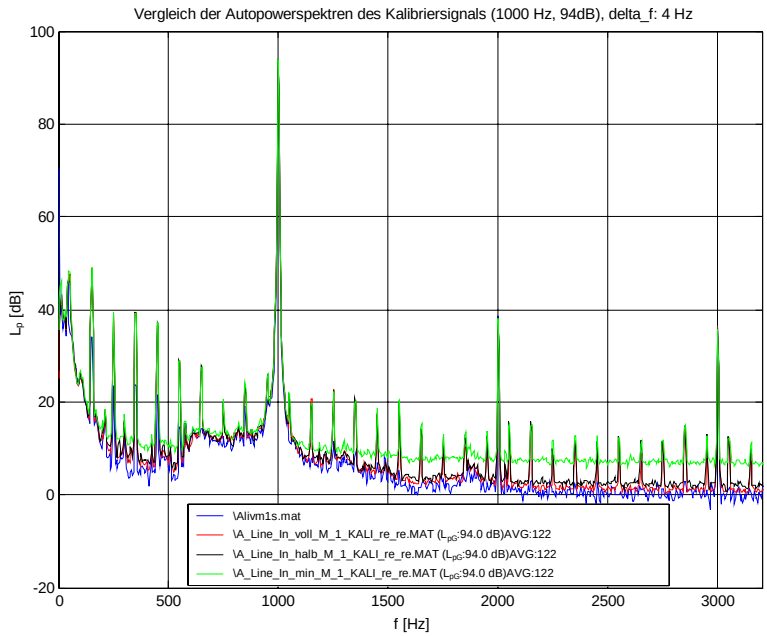


Abbildung 13.2: Vergleich der Autopowerspektren des Kalibriersignals von 1000 Hz (Akustikkalibrator): blau: HP-Analysator, rot: Soundkarte (Line-In-Regler maximal), schwarz: Soundkarte (Line-In-Regler mittel), grün: Soundkarte (Line-In-Regler minimal).
Die Frequenzauflösung beträgt bei allen vier Spektren 4 Hz.

Vergleicht man alle Spektren miteinander (Abbildung 13.2) so fällt der Einfluss der Line-In-Aussteuerung besonders oberhalb von 1500 Hz deutlich auf. Die erkennbaren Differenzen befinden sich im Bereich von etwa 8 dB, machen aber eine qualitative Aussage über die Line-In-Einstellungen möglich. Während sich das Spektrum des HP-Analysators zunehmend dem Schalldruckpegel von 0 dB nähert (ab etwa 2000 Hz), bleiben die Spektren der Soundkartensignale darüber. Dabei zeigt sich, dass höhere Aussteuerungen einen niedrigeren Rauschanteil besitzen (rote Kurve). Der Unterschied zwischen der maximalen und mittleren Reglerstellung ist nicht sehr groß. Am ungünstigsten ist eine Reglerstellung auf einen Minimalwert (grüne Kurve). Die ungefähren mittleren Schalldruckpegel im Bereich ab 2500 Hz aufwärts (ohne Berücksichtigung der Harmonischen) der einzelnen Reglerstellungen lauten:

Reglerstellung	**[dB] Lp**
maximal	1
mittel	2
minimal	7

Tabelle 13.2: Schalldruckpegel bei unterschiedlichen Line-In-Reglerstellungen (ab etwa 1500 Hz (Abbildung 13.2)).

Durch eine Erhöhung der Frequenzauflösung können die Rauschpegel weiter reduziert werden. Die relativen Abstände zwischen den drei Line-In-Einstellungen bleiben dabei allerdings bestehen (Abbildung 13.3).

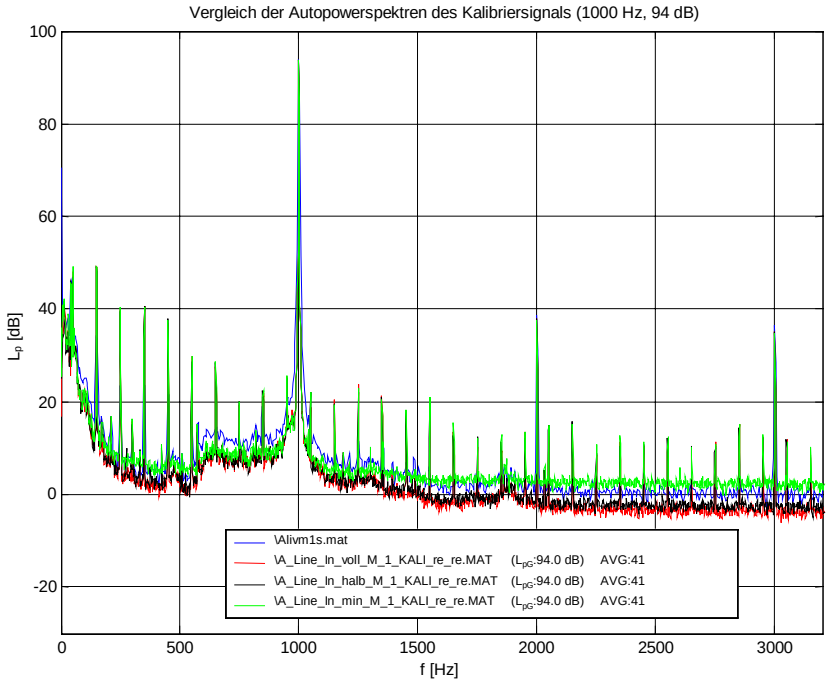


Abbildung 13.3: Vergleich der Autopowerspektren des Kalibriersignals von 1000 Hz (Akustikkalibrator): blau: HP-Analysator, rot: Soundkarte (Line-In-Regler maximal), schwarz: Soundkarte (Line-In-Regler mittel), grün: Soundkarte (Line-In-Regler minimal).
Die Frequenzauflösung beträgt bei dem HP-Spektrum 4 Hz, bei den Soundkartenspektren 1,3458 Hz.

13.1.1 Clipping

Bei einer zu hohen Aussteuerung kann es passieren, dass Signalanteile den Übertragungsbereich der Soundkarte übertreten. Bei Sinussignalen ist dies durch abgeschnittene Kuppen im Zeitbereich erkennbar (1) (Abbildung 13.4).

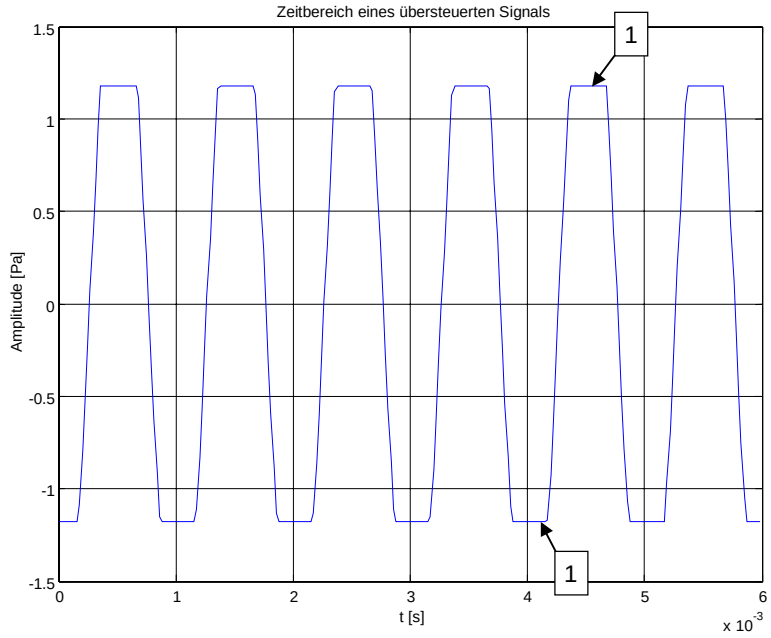


Abbildung 13.4: Zeitbereich eines übersteuerten Signals.
Aufgenommen wurde ein Signal von 1000 Hz und 114 dB bei maximaler Aussteuerung.

Die durch das „Clipping“ hervorgerufenen Abweichungen von einem Sinus gehen deutlich in die Frequenzanalyse ein (rote Kurve in Abbildung 13.5). Abhilfe schafft in diesem Fall eine Verringerung der Aussteuerung.

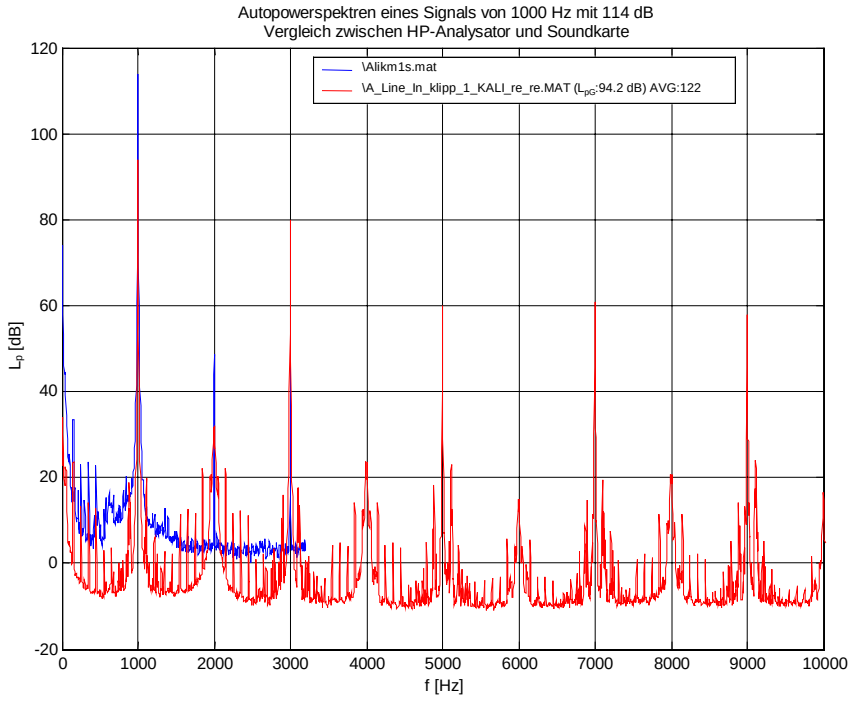


Abbildung 13.5: Darstellung der Spektren des Signals von 1000 Hz und 114 dB:
Vergleich zwischen HP-Analysators (blau) und der Soundkarte (rot) bei einer identischen Frequenzauflösung von 4 Hz. Das Soundkartensignal ist übersteuert.

13.2 Vergleich aufgezeichneter Messpunkte

Um die Soundkarte als vorrangiges Messinstrument verwenden zu können, muss sicher gestellt werden, dass die Ergebnisse aus ihren Werten mit den Angaben des HP-Analysators stimmig sind. Dazu wurden zwei Messungen der Messreihe 260203 herangezogen, die mit dem HP-Analysator und der Soundkarte aufgezeichnet wurden. Der Vergleich bei nahezu identischer Frequenzauflösung zeigt besonders im unteren Frequenzbereich bis 4500 Hz eine gute Übereinstimmung der Spektren (Abbildung 13.6, Abbildung 13.7).

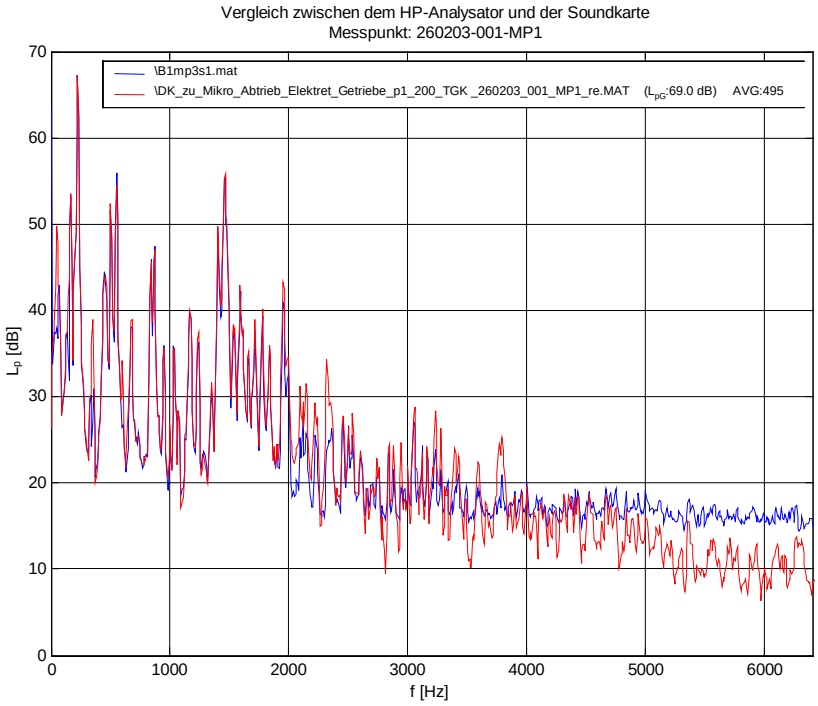


Abbildung 13.6: Vergleich zwischen dem HP-Analysator (blau) und der Soundkarte (rot): Autopowerspektrum des Messpunktes 260203-001-MP3; Die Frequenzauflösung beider Spektren ist identisch (HP-Spektrum 8 Hz, Soundkartenspektrum 7,9993 Hz). (Soundkartensignal bei einer günstigen Aussteuerung, vgl. Abbildung 13.5)

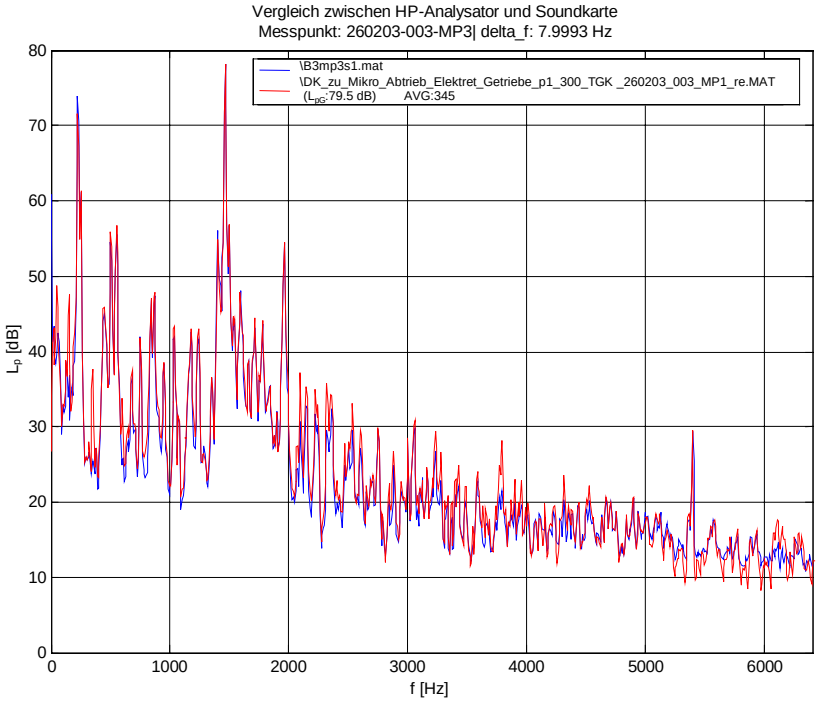


Abbildung 13.7: Vergleich zwischen dem HP-Analysator (blau) und der Soundkarte (rot): Autopowerspektrum des Messpunktes 260203-003-MP3; Die Frequenzauflösung beider Spektren ist identisch (HP-Spektrum 8 Hz, Soundkartenspektrum 7,9993 Hz).

Wird die Frequenzauflösung weiter erhöht, nimmt der Rauschanteil ab (Abbildung 13.8).

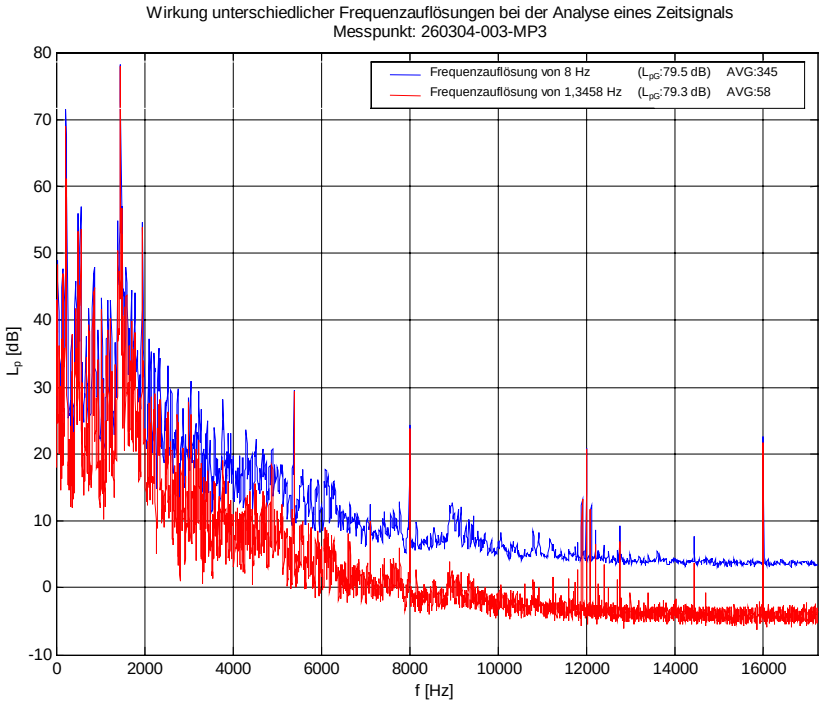


Abbildung 13.8: Darstellung der Wirkung einer Erhöhung der Frequenzauflösung bei der Berechnung eines Autopowerspektrums: blau: Δf = 7,9993 Hz, rot: Δf = 1,3458 Hz.

13.3 Ergebnis

Die Untersuchung der Line-In-Aussteuerung macht deutlich, dass die Messungen möglichst mit einer hohen Aussteuerung (hohe Reglerstellung) des Eingangs durchgeführt werden sollten. Dabei ist die maximale Aussteuerung nur sinnvoll, wenn ein „Clipping“ ausgeschlossen werden kann. Im anderen Fall ist eine geringere Aussteuerung zu wählen, wobei die Tatsache ausgenutzt werden kann, dass zwischen einer maximalen und mittleren Einstellung keine großen Unterschiede auftauchen. Im Zweifelsfall ist eine mittlere Reglerstellung zu wählen, wenn nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Schalldruckpegel der Messungen den Schalldruckpegel des Kalibriersignals übersteigen. Das „Clipping“ ist gut im Zeitbereich zu erkennen und kann somit schon bei der Aufzeichnung des Kalibriersignals ausgemacht werden.
Die letzte Untersuchung bezüglich der Wiedergabe der Spektren zeigt, dass es ausreicht, die Soundkartensignale alleine auszuwerten, ohne diese stets mit den HP-Spektren vergleichen zu müssen.

14 Akustische Messungen am Drehkanal

Die akustischen Messungen an Ventilatoren dürfen durch den Betrieb des Drehkanals nicht beeinflusst werden. Um Kenntnisse über die Betriebsgeräusche des Drehkanals zu erhalten, wurden an ihm akustische Messungen durchgeführt. Dazu wurde der Drehkanal ohne angeschlossene Kanalleitungen im Labor für Strömungsmaschinen der Fachhochschule Düsseldorf aufgebaut. Die Messungen erfolgten mittels eines B & K-Mikrofons im Drehkanal und eines Elektretmikrofons am Getriebe und wurden sowohl am offenen, als auch am geschlossenen Drehkanal durchgeführt. Diese Versuche dienten darüber hinaus der Funktionsprüfung des Mess- und Steuerprogramms und des Drehkanals.

14.1 Messaufbau

In der Übersichtsskizze (Abbildung 14.1) ist die relative Positionierung der Geräte der Messkette zueinander abgebildet. Die Messkette selbst ist in Abbildung 14.2 skizziert.

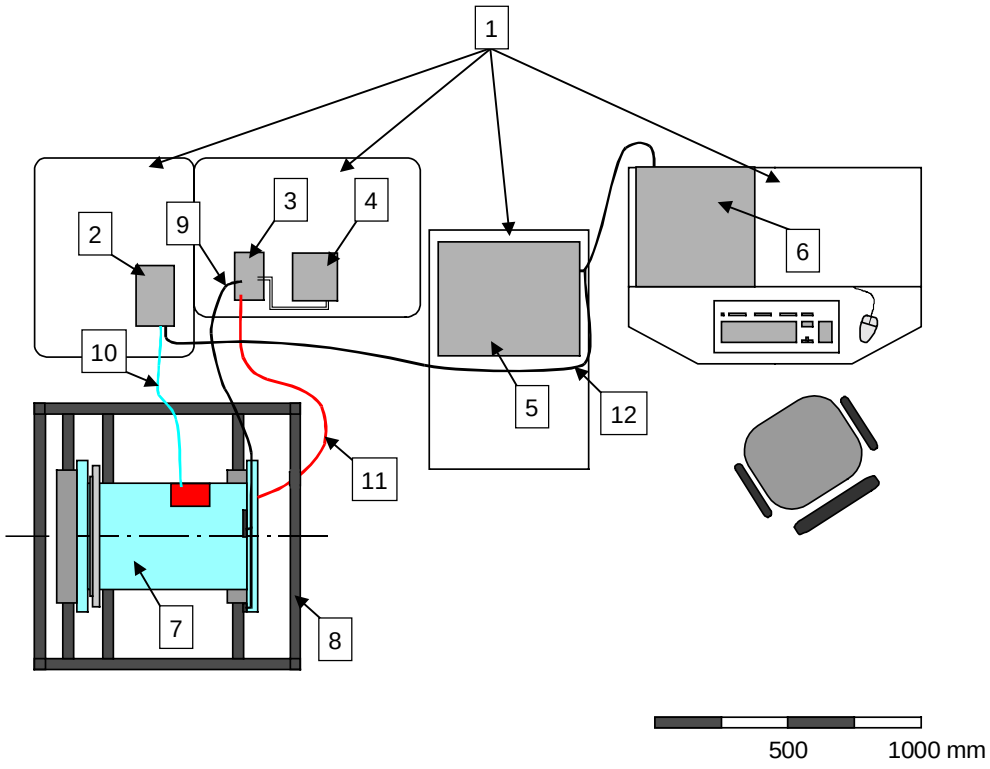


Abbildung 14.1: Übersichtsskizze des Messaufbaus, ohne Elektretmikrofon, Legende s. Tabelle 14.1.

Legende zu Abbildung 14.1			
1	Tische	7	Drehkanal
2	Nexus Signalkonditionierer	8	Drehkanalgestell
3	Positioniersteuerung TLC 511-F (für die Messungen liegend befestigt)	9	Steuerleitung für die Endschalter
4	Netzgerät (24 V-Spannungsversorgung für die Positioniersteuerung)	10	Mikrofonkabel des B&K-Mikrofons
5	HP-Analysator	11	Motorkabel
6	PC mit eingebauter Soundkarte	12	BNC-Kabel zum HP-Analysator, danach Weiterführung zur Soundkarte

Tabelle 14.1: Legende zu Abbildung 14.1.

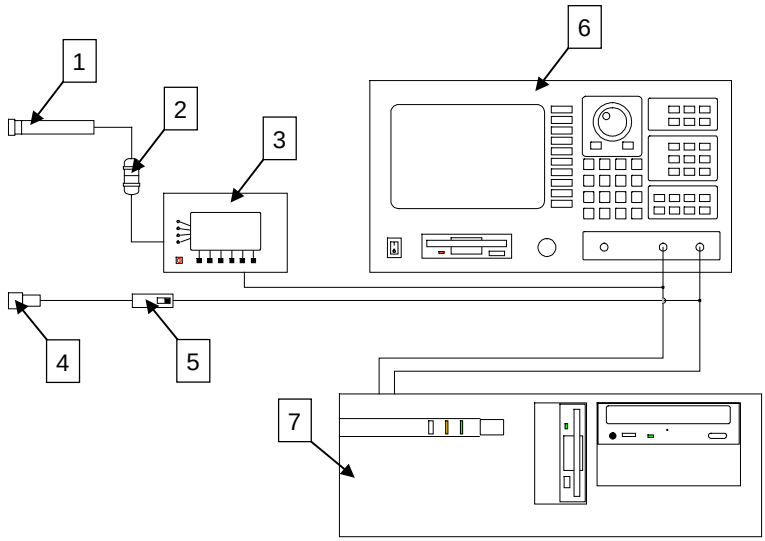


Abbildung 14.2: Skizze der Messkette.

1	B&K Mikrofon mit Vorverstärker	5	Vorverstärker des Elektretmikrofons
2	Steckeradapter von 7-pol. B & K-Steckersystem auf das Lemosystem	6	HP-Analysator
3	Nexus Signalkonditionierer	7	PC mit eingebauter Soundkarte und dem Steuerungs- und Messprogramm
4	Elektretmikrofon		

Tabelle 14.2: Legende zur Abbildung 14.2.

Eine Aufstellung der verwendeten Geräte ist im Anhang 20.1 enthalten.

Bei den Messungen befand sich das B & K-Mikrofon im Drehkanal.

Der Drehkanal wurde für die Messungen im offenen und geschlossenen Zustand betrieben (Abbildung 14.3).

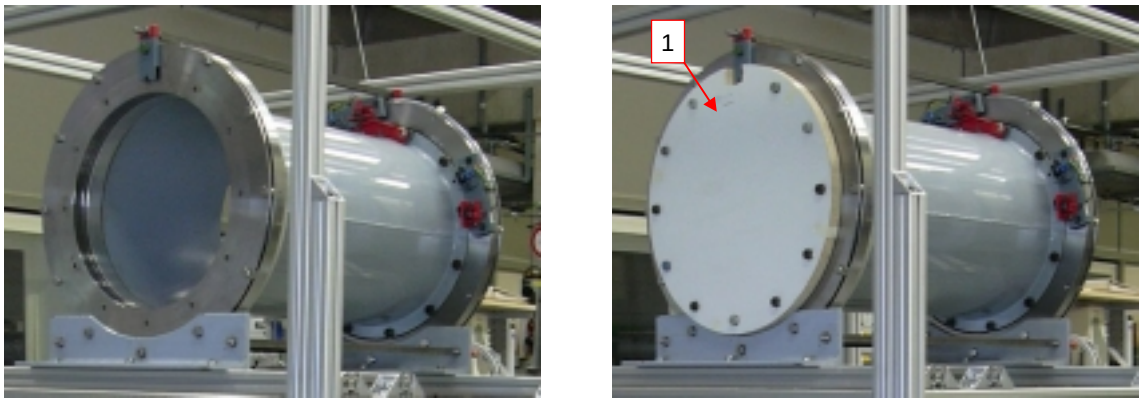


Abbildung 14.3: Darstellung des offenen (links) und des geschlossenen (rechts) Drehkanals: Der Drehkanal wurde mit 25 mm starken Holzplatten (1) geschlossen.

Dabei wurden zwei Einbauzustände unterschieden. Im ersten Zustand wies die Mikrofonmembran in Richtung des Riemenantriebes (1) (Abbildung 14.4), im zweiten Zustand in die entgegengesetzte Richtung (2).

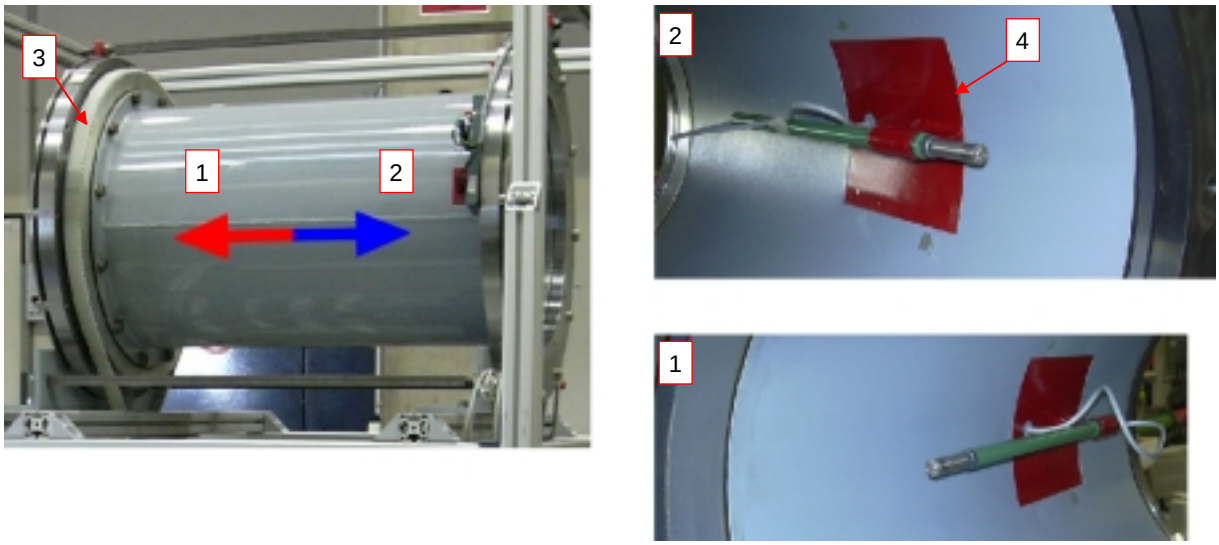


Abbildung 14.4: Ausrichtung des Mikrofons im Drehkanal: 1: In Antriebsrichtung, 2: In Abtriebsrichtung, 3: Antriebsriemen. In den beiden kleinen Bildern rechts ist die Befestigung des Messmikrofons mittels der Mikrofonhalteklappe (4) im Drehkanal bei der jeweiligen Ausrichtung ((1) oder (2)) zu sehen.

Zur einfacheren Zuordnung der Messdateien wurde eine Dateikennung eingeführt, nach der der erste Einbauzustand mit „Antrieb“ und der zweite mit „Abtrieb“ zu kennzeichnen war.

14.2 Durchführung der Messungen

Die Messungen wurden mit Hilfe der ersten Version des eigens zur Steuerung des Drehkanals programmierten Programms durchgeführt. In dieser Programmversion wurde beispielsweise

nicht nach jedem Messpunkt die Soundkarte geschlossen, wie es in Abschnitt 9.4.6 beschrieben ist.

Nach jeder Manipulation am Mikrofon, durch Positionswechsel oder Ein- und Ausbau der Mikrofonklappe wurde ein Kalibriersignal aufgenommen. Der Drehkanal fuhr abwechselnd für eine volle Umdrehung nach rechts und nach links, wobei jede Umdrehung einen Messpunkt darstellte. Nach Beendigung der Messfahrten wurden drei aufeinanderfolgende Messungen im Stillstand des Drehkanals durchgeführt. Diese etwa 30 Sekunden dauernden Stillstandsmessungen geschahen stets in der Ausgangsstellung des Kanals und sind durch den Namenszusatz „HOCH“ gekennzeichnet.

In der Messreihe 260203 wurde neben dem Mikrofon im Drehkanal ein weiteres Mikrofon am linken Soundkartenkanal hinzugeschaltet. Dabei handelte es sich um ein Elektretmikrofon, welches senkrecht auf das Getriebegehäuse aufgesetzt wurde (Abbildung 14.5).

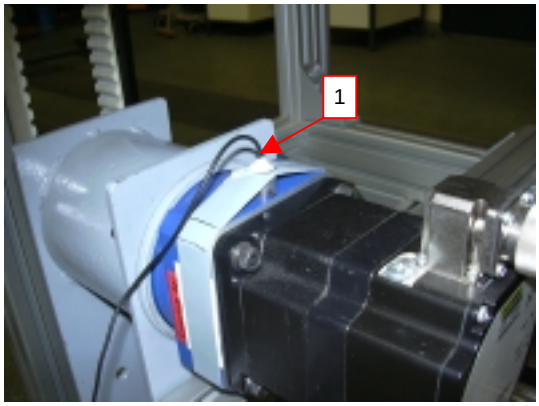


Abbildung 14.5: Befestigung des Elektretmikrofons (1) auf dem Getriebegehäuse mit Hilfe von Klebeband.

14.2.1 Messreihenübersicht

Eine Übersicht der Messreihen wird in der nachfolgenden Tabelle gegeben. Bei den Messungen waren stets der HP-Analysator und die Twin Line Steuereinheit (TLC) (zusammen mit dem 24 V Netzteil) in Betrieb. Bei Abweichungen wird dies in der Tabelle 14.3 angegeben.

Messreihe	MR	Kanal	[min^{-1}] n_M | n_{DK}	ST	MF	DR	DK	Hinweise
190203								Messungen am offenen DK
-001	An	re.	200 | 1	3	5	re.-a	o	Bei –002 und –003 war der HP-
-002	An	re.	200 | 1	3	5	re.-a	o	Analysator ausgeschaltet.
-003	Ab	re.	200 | 1	3	5	re.-a	o	
-004	Ab	re.	200 | 1	3	5	re.-a	o	
-005	Ab	re.	200 | 1	4	5	re.-a	o	
200203								Messungen am stillstehenden DK
-001	Ab	re.	0 | 0	4	-	-	o	Bei allen Messungen war das TLC
-002	Ab	re.	0 | 0	4	-	-	z	ausgeschaltet.
-003	An	re.	0 | 0	4	-	-	z	
-004	An	re.	0 | 0	4	-	-	o	
250203								Messungen am geschlossenen DK
-001	Ab	re.	200 | 1	3	6	re.-a	z	Vergleichsmessungen zur Reihe
-002	An	re.	200 | 1	3	8	re.-a	z	190203
260203								Messungen am geschlossenen DK
-001	Ab	re., li.	200 | 1	3	6	re.-a	z	1. Mikrofon im Drehkanal (re.
-002	Ab	re., li.	150 | 0,75	3	4	re.	z	Kanal)
-003	Ab	re., li.	300 | 1,5	3	6	re.-a	z	2. Mikrofon auf dem Getriebe (li.
-004	Ab	re., li.	100 | 0,5	4	6	li.-a	z	Kanal)

Tabellenlegende:

MR : Einbaurichtung des Mikrofons (An = Antrieb, Ab = Abtrieb)
Kanal : Soundkartenkanal über den aufgenommen wurde
n_M : Drehzahl des Schrittmotors
n_{DK} : Drehzahl des Drehkanals
ST : Anzahl der Messungen im Stillstand des Drehkanals
MF : Anzahl der Messungen bei Messfahrten des Drehkanals
DR : Drehrichtung des Drehkanals, Angabe der Richtung der ersten Drehung (re. oder li.), ein „a“ kennzeichnet, dass ab der 1. Drehung abwechselnd in beide Richtungen gedreht wurde. Sonst wurde nur eine Drehrichtung gefahren
DK : DK = Drehkanal. Diese Spalte gibt den Zustand des Drehkanals an (o = offen, z = geschlossen)

Tabelle 14.3: Übersicht über die durchgeführten Messreihen.

15 Auswertung

Aus der Auswertung sollten zu den folgenden Gesichtspunkten Aussagen hervorgehen:

1. Wie ist die Dämpfung durch die Holzplatten zu beurteilen ?
2. Gibt es einen messbaren Unterschied zwischen den Mikrofoneinbaupositionen ?
3. Welche Betriebsgeräusche sind nach der Analyse der akustischen Signale zu erkennen ?

15.1 Werkzeuge

Die Auswertung der Daten erfolgte unter MATLAB. Die Quelltexte der verwendeten MATLAB-Programme sind im Anhang aufgeführt. Zunächst wurden Autopowerspektren und der zeitabhängige Gesamtschalldruckpegel (Abbildung 15.1) jeder Messung berechnet. Zusammen mit dem zeitabhängigen Gesamtschalldruckpegel konnten bei Hörproben manche Ausschläge in den Diagrammen (vgl. Abbildung 15.1) erklärt werden. Dateien mit besonders stark hörbaren Störungen, die eindeutig nicht vom Drehkanal stammten, wurden dann aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

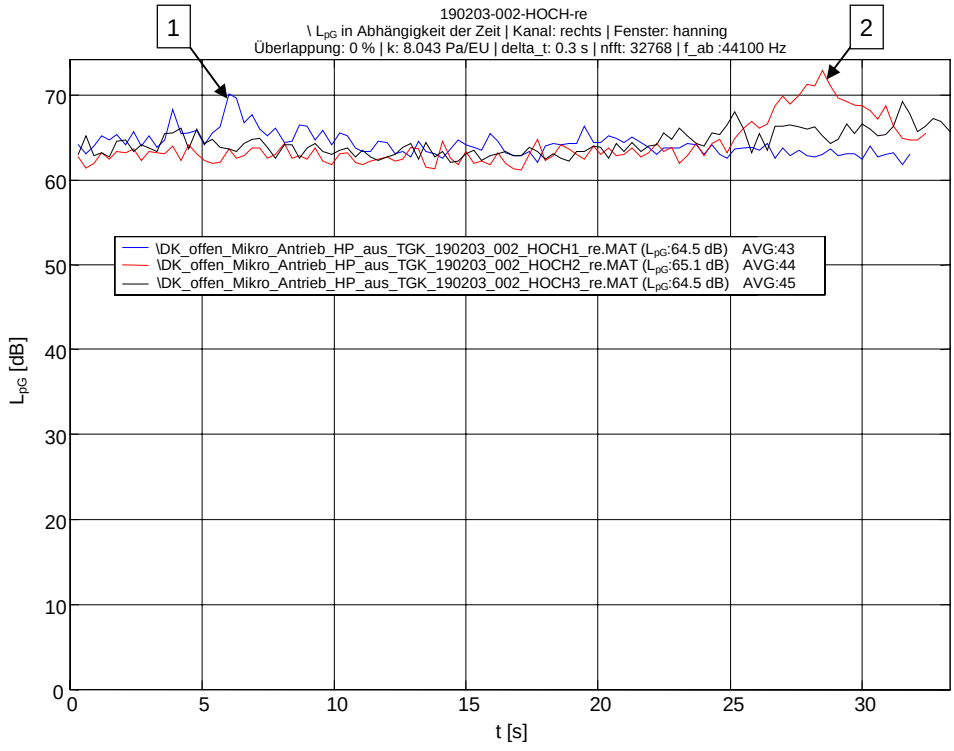


Abbildung 15.1: Zeitabhängiger Gesamtschalldruckpegel der Stillstandsmessungen der Messreihe 190203-002: Deutlich zu erkennen sind die Störungen (1) und (2), im Hörtest konnten sie als Hintergrundgeräusche von Fahrzeugen bestimmt werden.

Die Autopowerspektren wurden quadratisch gemittelt. Die Berechnung des zeitlichen Verlaufs des Gesamtschalldruckpegels erfolgte aus den Zeitdaten mit einem Δt von 0,3 s.
Um die zu analysierende Datenmenge zu reduzieren, wurden die Autopowerspektren, die Terzspektren und die Gesamtschalldruckpegelverläufe mehrer Messungen gemittelt (MATLAB-Programm Mat_multiread_Mittelung.m). Pro Messreihe wurden die Spektren der Drehkanalrechtsdrehung, der -linksdrehung und des Drehkanalstillstandes energetisch gemittelt, so dass schließlich drei Ergebnisdateien verblieben. Diese Dateien wurden mit dem Zusatz „mittel“ im Dateinamen kenntlich gemacht.

15.2 Dämpfung durch die Holzplatten

Für eine Beschreibung der Dämpfung durch die Holzplatten wurden bei stillstehendem Drehkanal Messungen mit und ohne montierten Holzplatten durchgeführt. Die Messreihen 200203-001 (offener Drehkanal) und 200203-002 (geschlossener Drehkanal) werden nachfolgend miteinander verglichen. Die Abbildung 15.2 und Abbildung 15.3 zeigen den Vergleich anhand der Autopowerspektren und der Gesamtschalldruckpegelverläufe. Aus Abbildung 15.2 geht hervor, dass eine Dämpfung der Umgebungsgeräusche besonders im unteren Frequenzbereich bis etwa 4000 Hz notwendig war und auch erzielt werden konnte.

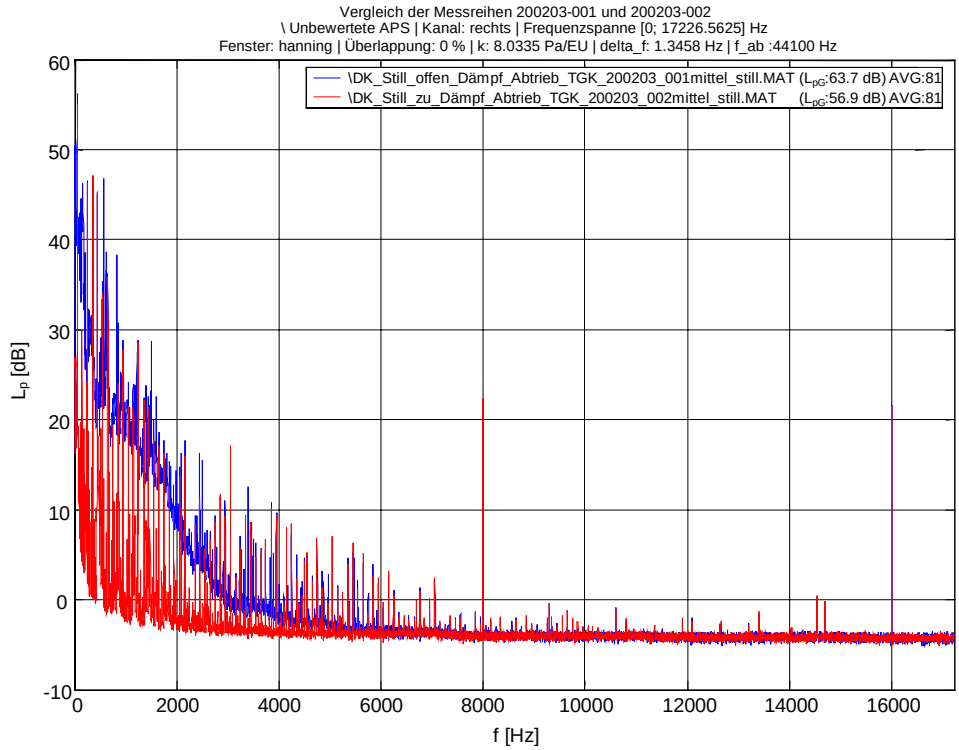


Abbildung 15.2: Vergleich der Autopowerspektren der Stillstandsmessungen bei offenem (blau) und geschlossenem (rot) Drehkanal.

Es ist zu beachten, dass die Holzplatten schallharte Kanalabschlüsse darstellen, die im Inneren des Drehkanals zu ungewollten Reflexionen führen können. Aus diesem Grund ist eine Aussage über die Dämpfungseigenschaften der Holzplatten mit Vorsicht zu betrachten.
Nach Abbildung 15.3 ist eine Dämpfung des Gesamtschalldruckpegels bei Stillstand des Kanals von etwa 4 dB erzielt worden.

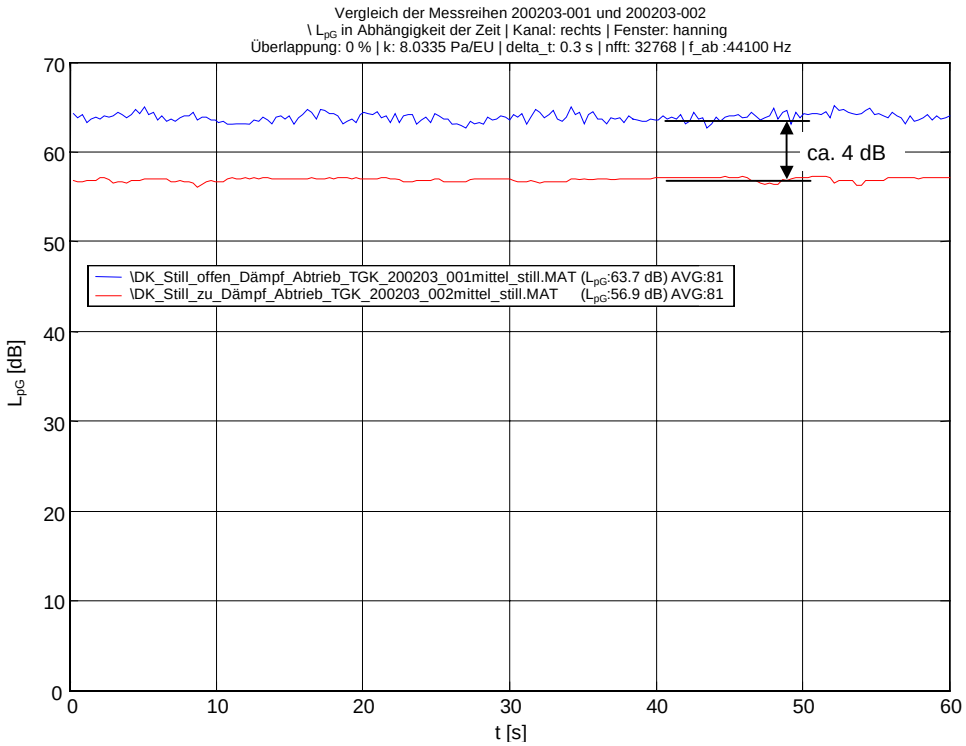


Abbildung 15.3: Zu Abbildung 15.2 gehörende Darstellung der zeitabhängigen Gesamtschalldruckpegel: Durch Schließen des Drehkanal wird der Gesamtschalldruckpegel um fast 4 dB gesenkt. blau: offener Drehkanal; rot: geschlossener Drehkanal.

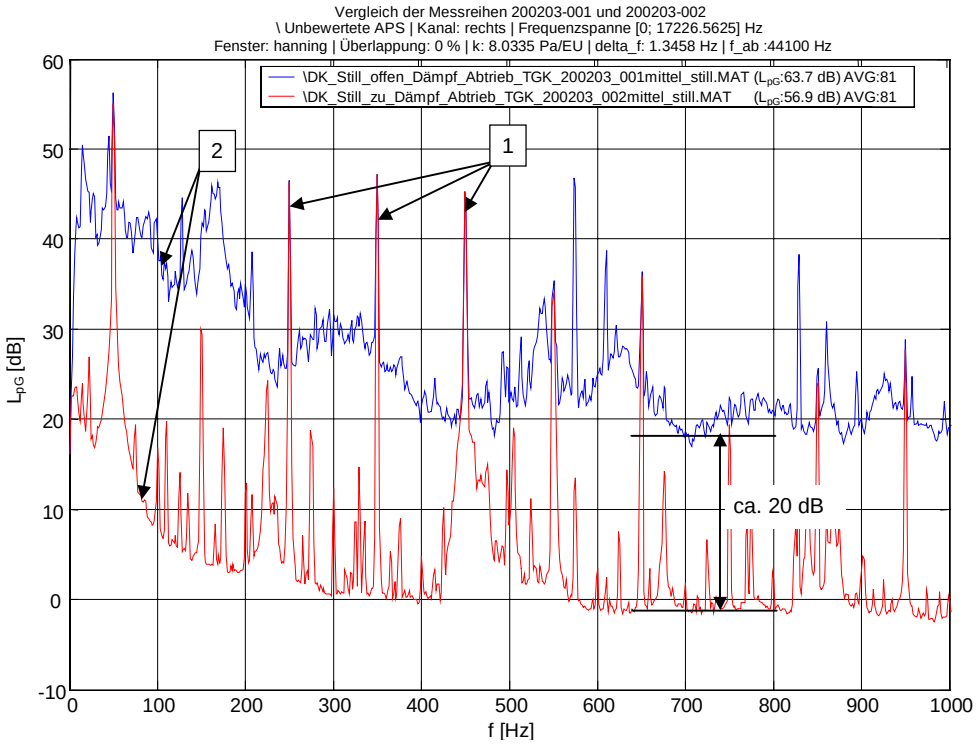


Abbildung 15.4: Vergrößerung des APS-Bereiches aus Abbildung 15.2 von 0 bis 1000 Hz: blau: offener Drehkanal; rot: geschlossener Drehkanal.

Wie aus Abbildung 15.4 zu ersehen ist, treten bei geschlossenem Drehkanal geringere Rauschpegel hervor (2). Diese wurden sogar um bis zu 20 dB gedämpft. Störsignale, die nicht aus der Umgebung kamen, sondern über die Kabel empfangen wurden, wie das Brummen der Netzspannung bei 50 Hz und deren Harmonische erscheinen als tonale Komponenten ungedämpft (1). Es kann daher lediglich gesagt werden, dass mittels der Holzplatten eine Reduzierung des Einflusses der Pegel aus der Umgebung stattgefunden hat. Ähnlich sind die Verhältnisse bei Einbau des Mikrofons in „Antriebs“-Richtung.

Aufgrund dieser Erkenntnis werden für die Beurteilung der Geräusche im Drehkanalbetrieb die Messungen bei geschlossenem Kanal herangezogen.

15.3 Einfluss der Einbauposition des Mikrofons und der Drehrichtung des Drehkanals

Zur Beurteilung dieser Frage werden die Messreihen 250203-001 und 250203-002 miteinander verglichen.

Abbildung 15.5 zeigt die Autopowerspektren einer Rechts- und einer Linksdrehung des Kanals für jeweils beide Einbaurichtungen des Mikrofons. Über den gesamten Frequenzbereich betrachtet, sind nur geringfügige Abweichungen der einzelnen Spektren zu erkennen. Im Ausschnitt von 0 bis 1000 Hz (Abbildung 15.6) sind keine eindeutigen Unterschiede zwischen den beiden Einbaupositionen des Mikrofons und der Drehrichtung zu sehen.

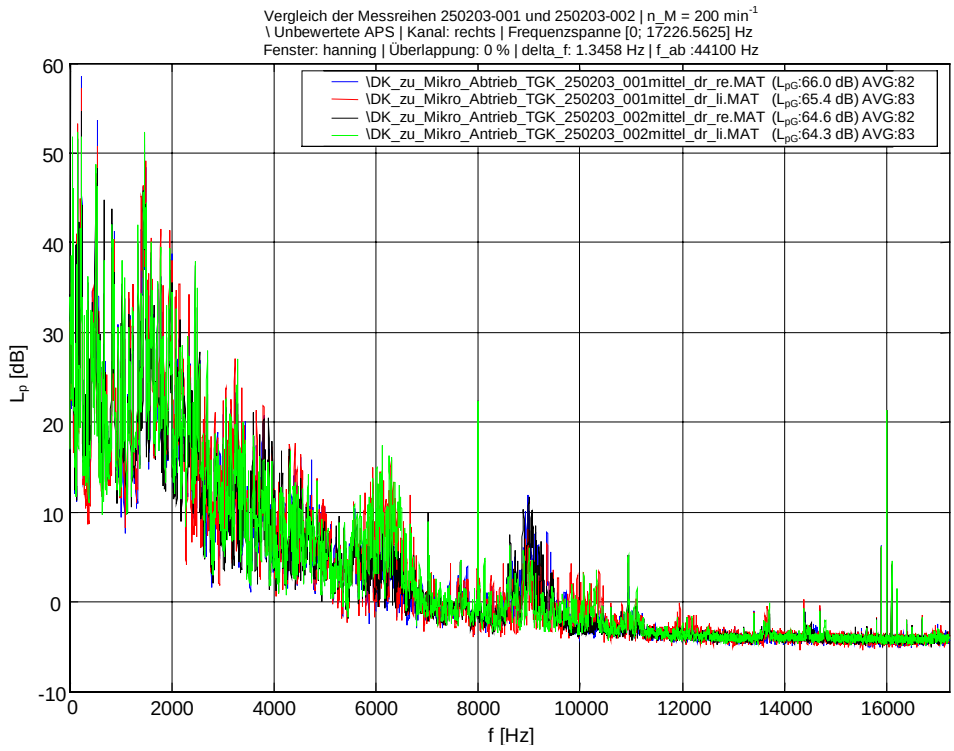


Abbildung 15.5: Vergleich der Autopowerspektren beider Einbaurichtungen des Mikrofons und der beiden Drehrichtungen: Rechtsdrehung: blau und schwarz, Linksdrehung: rot und grün Schrittmotordrehzahl n_M = 200 min^{-1}.

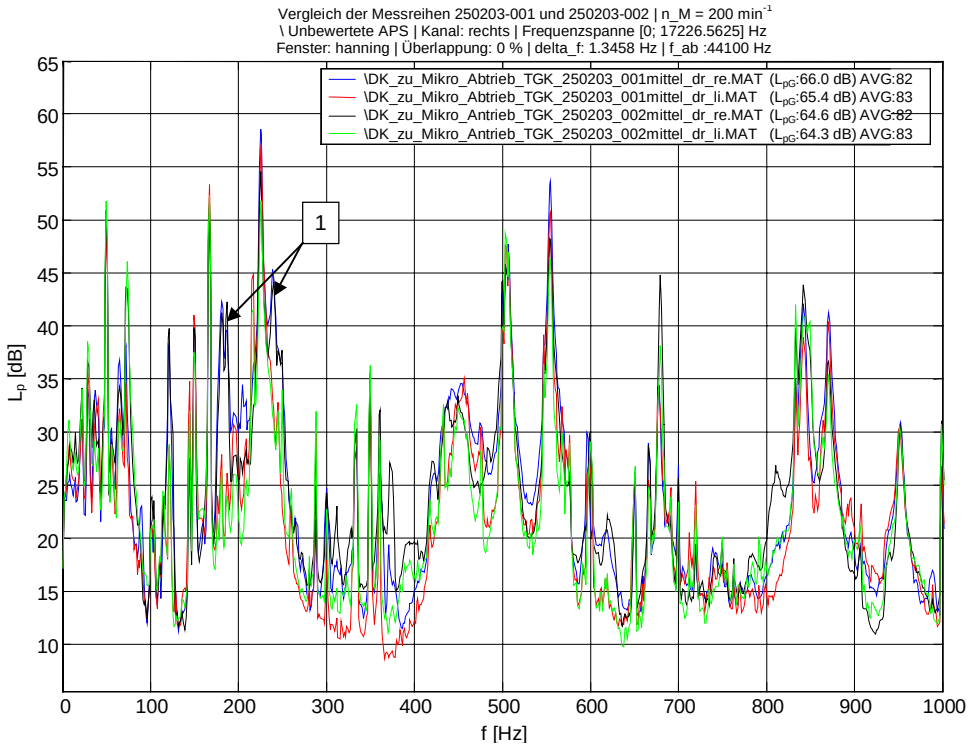


Abbildung 15.6: Ausschnitt aus Abbildung 15.5 (0 bis 1000 Hz): Rechtsdrehung: blau und schwarz, Linksdrehung: rot und grün.

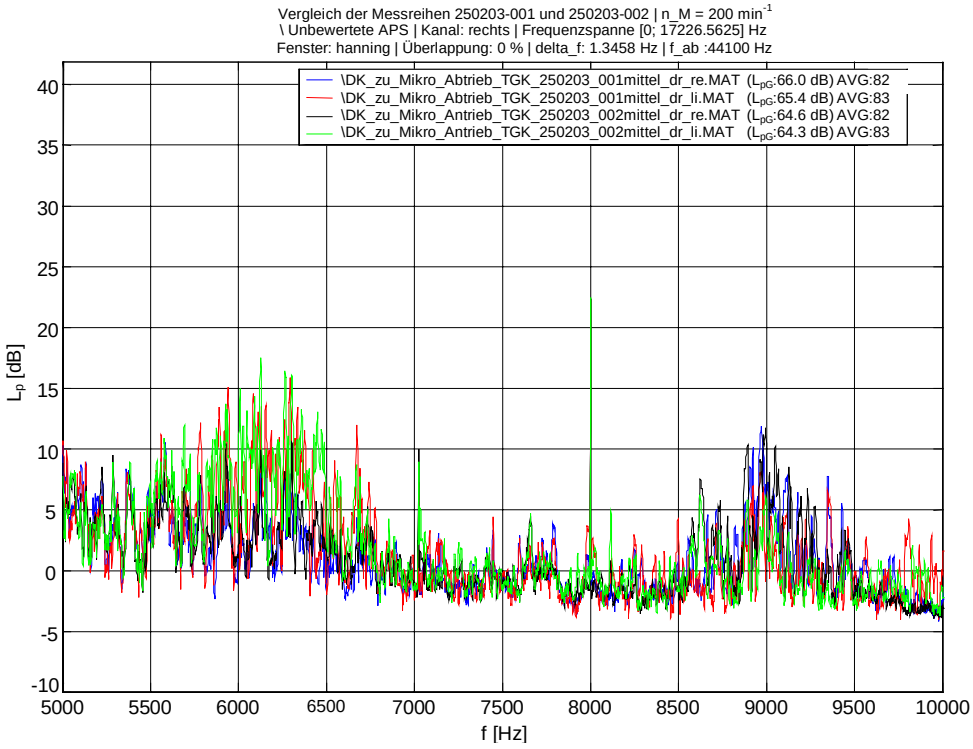


Abbildung 15.7: Pegelanhebung im mittleren Frequenzbereich durch die Endschalteraktivität: Rechtsdrehung: blau und schwarz, Linksdrehung: rot und grün Schrittmotordrehzahl n_M = 200 min^{-1}.

Betrachtet man den Bereich zwischen 5000 Hz und 10000 Hz (Abbildung 15.7), so fällt auf, dass bei Rechtsdrehungen Pegel im Bereich von 9000 Hz dominieren und bei Linksdrehungen Pegel in der Nähe von 6000 Hz verstärkt auftreten. Aufgrund von Beobachtungen der Anzeige des HP-Analysators während der Messfahrten ist bekannt, dass diese Pegel den Endschaltern zuzuschreiben sind. Diesen Schaltereignissen sind auch die Pegel bei 180 Hz und 240 Hz (s. Abbildung 15.6) mit großer Wahrscheinlichkeit zuzuschreiben. Im Zeitverlauf des Gesamtschalldruckpegels (Abbildung 15.8) erkennt man den vorherrschenden Unterschied zwischen den beiden Drehrichtungen. Während im Zeitbereich von 20 bis 50 Sekunden keine bedeutenden Unterschiede zwischen den beiden Einbaupositionen des Mikrofons und der Drehrichtung des Drehkanals zu erkennen sind, heben sich beide Drehrichtungen in den Bereichen (2) und (3) deutlich von einander ab. Außerdem sind bei der Linksdrehung im Abschnitt (1) und bei der Rechtsdrehung im Bereich (4) weitere Anhebungen des Gesamtschalldruckpegels auszumachen. Diese Ausschläge werden durch die Endschalteraktivitäten hervorgerufen. Der Bereich (3) macht zudem deutlich, dass der momentane Gesamtschalldruckpegel durch die Schaltergeräusche kurzzeitig um fast 10 dB angehoben werden kann.

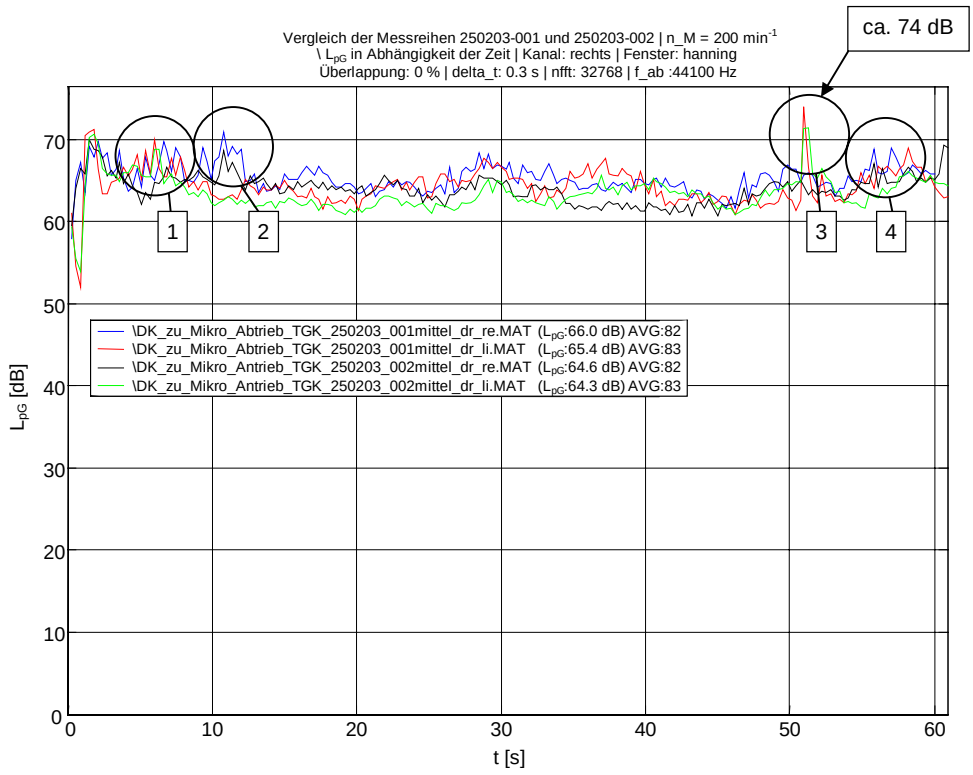


Abbildung 15.8: Unterschiede im Gesamtschalldruckpegel der Rechts- und Linksdrehungen: Rechtsdrehung: blau und schwarz, Linksdrehung: rot und grün Schrittmotordrehzahl n_M = 200 min^{-1}.

Diese Pegelerhöhungen spielen in bezug auf die Beurteilung von störenden Geräuschen eine untergeordnete Rolle. Die beständigen Pegel in der Mittelung der Autopowerspektren (bei 180 Hz und 240 Hz in Abbildung 15.6 und bei 6000 Hz und 9000 Hz in Abbildung 15.7) sind mit 15 dB bis 40 dB gering, im Vergleich zu den benachbarten Pegeln, mit Werten ab 50 dB aufwärts. Dies wird bei der Betrachtung des Gesamtschalldruckpegels der Messung DK_zu_Mikro_Abtrieb_TGK_250203_001mittel_dr_li.MAT (Abbildung 15.8, rote Kurve) unterstrichen. Deren Gesamtschalldruckpegel von 65,4 dB wird durch den einmaligen Pegel von fast 74 dB nicht berührt.

15.4 Betriebsgeräusche des Drehkanals

Als Betriebsgeräusche sind alle Geräusche zu verstehen, die bei Betrieb des Drehkanals entstehen und durch die für den Antrieb und die akustische Messung erforderlichen Elemente hervorgerufen werden.

Für weitere Aussagen über den Einfluss des Antriebes auf die Betriebsgeräusche des Drehkanals wurden in den Messreihen 260203-001 bis 260203-004 verschiedene Drehgeschwindigkeiten des Kanals eingestellt (s. Tabelle 14.3, S. 134). Bei diesen Messreihen wurde ein zweites Mikrofon am linken Soundkartenkanal angeschlossen, welches Signale vom Getriebe aufzeichnete (s. Abbildung 14.5, S. 133). Die Auswertung der Messreihen gliedert sich in zwei Schritte. Im ersten Schritt wird der Frequenzbereich betrachtet, womit vor allem die Einflüsse erkannt werden können, die auch nach einer Mittelung in den Spektren verbleiben. Der zweite Schritt geht dann auf den Zeitbereich ein, wo, wie in Abschnitt 15.3 geschehen, der zeitliche Verlauf des Gesamtschalldruckpegels untersucht wird.

Bezugsgrundlage für die Auswertung ist der Einsatzzweck des Drehkanals. Bei der akustischen Messung an Ventilatoren ist es erforderlich, dass fremde, also nicht vom Messobjekt selbst emittierte Schallpegel, möglichst nicht gewichtig in die Messdaten eingehen. Daher wird als Bezug das Terzspektrum eines Ventilators hinzugezogen, dessen Messwerte bei niedriger Drehzahl aufgezeichnet wurden (Abbildung 15.9). Die Messdaten wurden im Rahmen der Diplomarbeit von Hr. Previti [29] aufgezeichnet. Tabelle 15.1 gibt die Daten des Ventilators wieder.

Position		Wert	Einheit
Radialventilator		VR45S10/630	
Laufraddurchmesser	D	0,631	[m]
Schaufelzahl	z	11	[1]
Lieferzahl	φ	0,08	[1]
Rohrdurchmesser	d_2	0,4	[m]
Gesamtschalldruckpegel[1]	L_{PG}	97,0	[dB]

Tabelle 15.1: Daten des Vergleichventilators, sowie Angabe des Betriebspunktes. Der angegebene Gesamtschalldruckpegel beruht auf dem Terzspektrum in Abbildung 15.9.

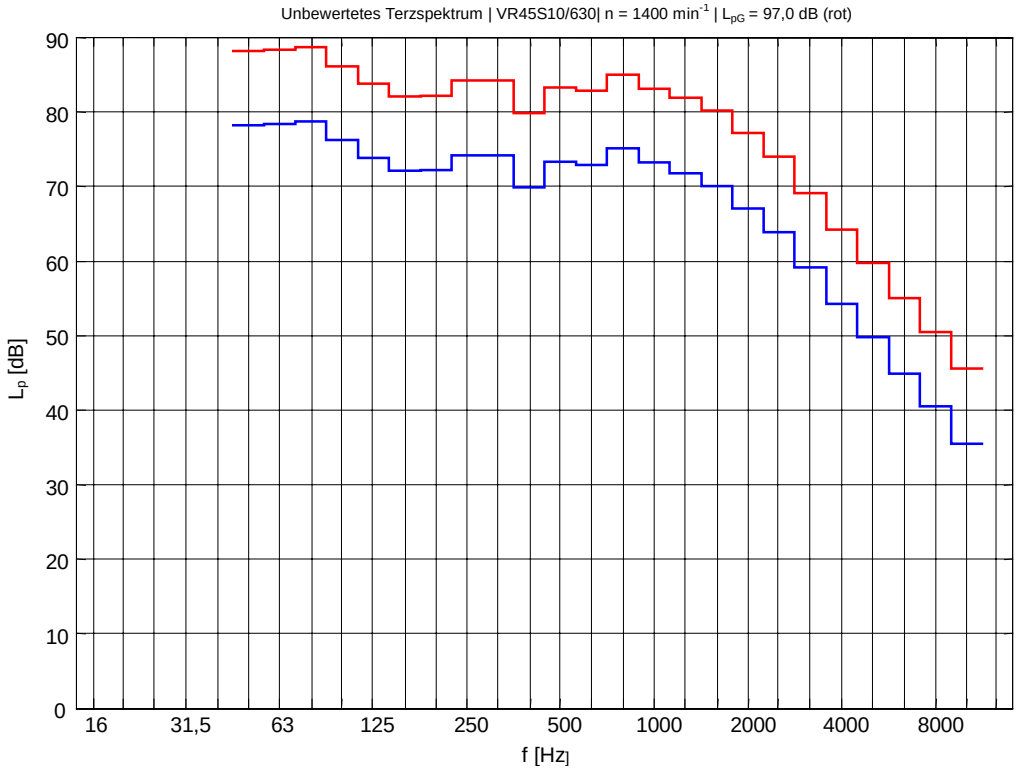


Abbildung 15.9: Terzspektrum eines Radialventilators bei relativ niedriger Drehzahl mit n = 1400 min^{-1}(rot): Die blaue Kurve stellt ein Spektrum dar, welches 10 dB unterhalb des gemessenen Terzspektrums des Ventilators liegt.

Das Terzspektrum in Abbildung 15.9 weist in seiner gegebenen Darstellung eine für Ventilatoren typische Charakteristik auf. Im unteren Frequenzbereich ist die Pegelabnahme in Richtung höherer Frequenz recht gering, ab etwa 2000 Hz nimmt die Abnahme jedoch erkennbar zu. Um mit dem Drehkanal akustische Messungen nach der Norm EN 25136 durchführen zu können, müssen die Fremdgeräuschpegel jedes Terzbandes mindestens 10 dB unterhalb den jeweiligen Schalldruckpegel des betriebenen Ventilators liegen (vgl. blaue Kurve in Abbildung 15.9).

15.4.1 Betrachtung des Frequenzbereiches

In diesem ersten Schritt werden die Autopowerspektren der Messfahrten bei verschiedenen Drehzahlen dahingehend betrachtet, welche störenden Pegel zu erkennen sind und ob deren Herkunft bestimmt werden kann. In den folgenden vier Diagrammen (Abbildung 15.10 bis Abbildung 15.13) werden dazu für jede eingestellte Drehzahl die Spektren der Rechts- und Linksdrehungen mit dem Spektrum des Drehkanalstillstandes verglichen. Diese Betrachtung beschränkt sich zunächst auf die Signale des Messmikrofons im Drehkanal (rechter Soundkartenkanal). In diesen Diagrammen kennzeichnen rote Kreise die aufgrund ihrer erhöhten Pegel besonders auffälligen Peaks.

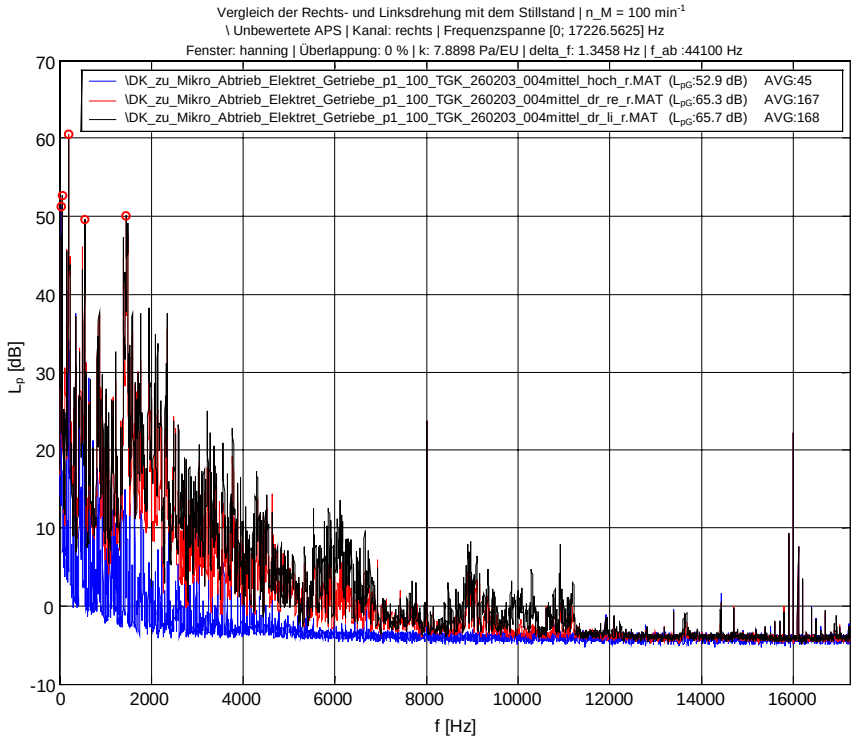


Abbildung 15.10: Gegenüberstellung der Autopowerspektren der Drehkanaldrehung bei $n_M = 100\ min^{-1}$ und des Kanalstillstandes: blau: Kanalstillstand ,rot: Rechtsdrehung, schwarz: Linksdrehung.

Abbildung 15.10 zeigt deutlich, dass sich im Vergleich zu den Pegeln im Stillstand die Pegel im Drehkanalbetrieb besonders im Frequenzbereich von etwa 1500 Hz bis 11000 Hz anheben. Auch bei höheren Drehzahlen bleibt diese Charakteristik bestehen. In allen vier Fällen liegt der Bereich der stärksten Anhebung im Bereich von 1000 Hz bis etwas über 2000 Hz (vgl. Abbildung 15.10 bis Abbildung 15.13).

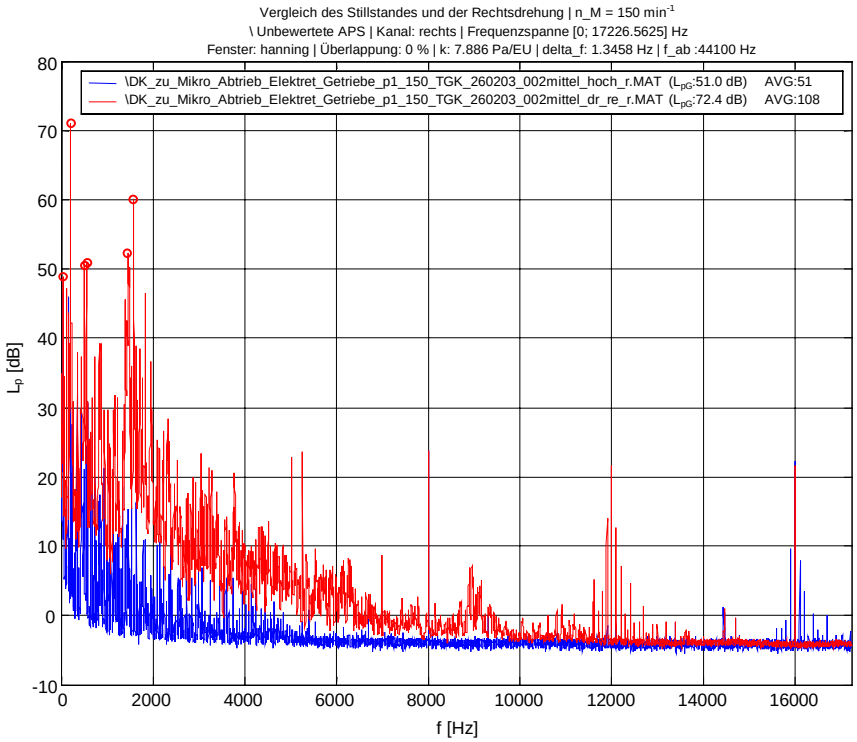


Abbildung 15.11: Gegenüberstellung der Autopowerspektren der Drehkanaldrehun bei n_M = 150 min^{-1} und des Kanalstillstandes: blau: Kanalstillstand, rot: Rechtsdrehung.

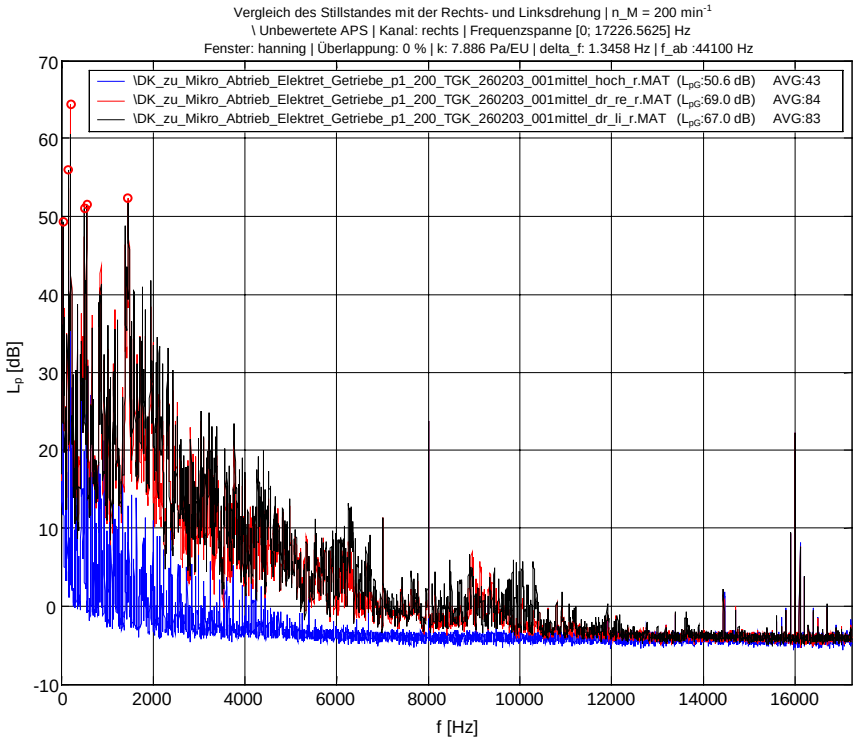


Abbildung 15.12: Gegenüberstellung der Autopowerspektren der Drehkanaldrehung bei n_M = 200 min^{-1} und des Kanalstillstandes: blau: Kanalstillstand, rot: Rechtsdrehung, schwarz: Linksdrehung.

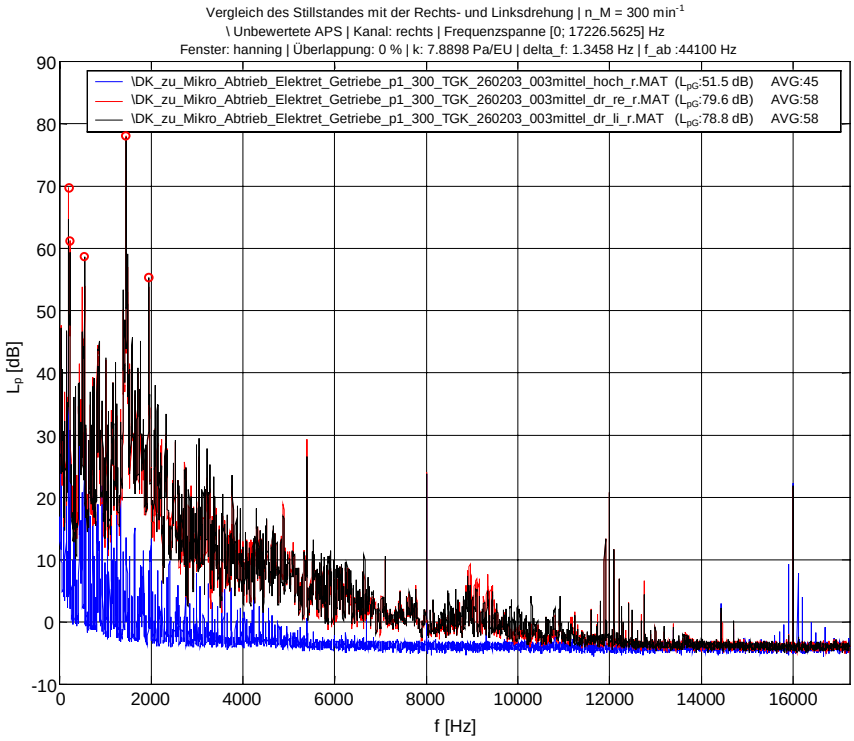


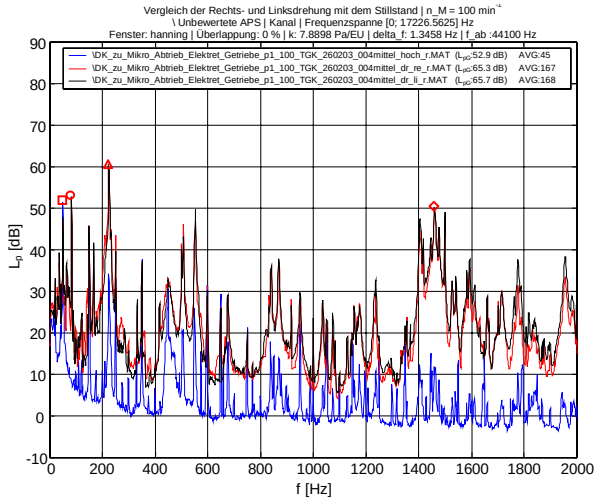
Abbildung 15.13: Gegenüberstellung der Autopowerspektren der Drehkanaldrehung bei n_M = 300 min^{-1} und des Kanalstillstandes: blau: Kanalstillstand, rot: Rechtsdrehung, schwarz: Linksdrehung.

Die weitere Untersuchung wird auf den Frequenzbereich von 0 Hz bis 2000 Hz beschränkt, da hier einzelne hohe Pegel auffallen (rote Kreise in Abbildung 15.10 bis Abbildung 15.13). Die Pegel des übrigen Bereiches sind mit weniger als 30 dB bei dieser Analyse nicht von Bedeutung.

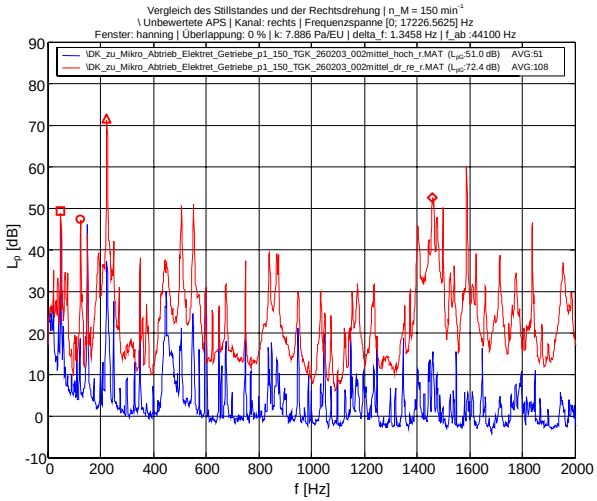
Eine Aussage über den Zusammenhang zwischen Gesamtschalldruckpegel und Motordrehzahl ist nicht ohne weiteres möglich, da der Gesamtschalldruckpegel sehr von den tonalen Komponenten im Spektrum dominiert wird und diese keine eindeutige Abhängigkeit, zumindest in ihrer Intensität, zu der Drehzahl erkennen lassen. Vielmehr lässt sich eine gesamte Anhebung des Spektrums im Bereich bis 2000 Hz rein optisch aus den Diagrammen erkennen, die sich einfach durch die Zunahme der Antriebsgeräusche von Motor und Getriebe erklären lässt.

Die nächste Abbildung (Abbildung 15.14) stellt den gewählten Frequenzbereich der vier Autopowerspektren einander gegenüber.

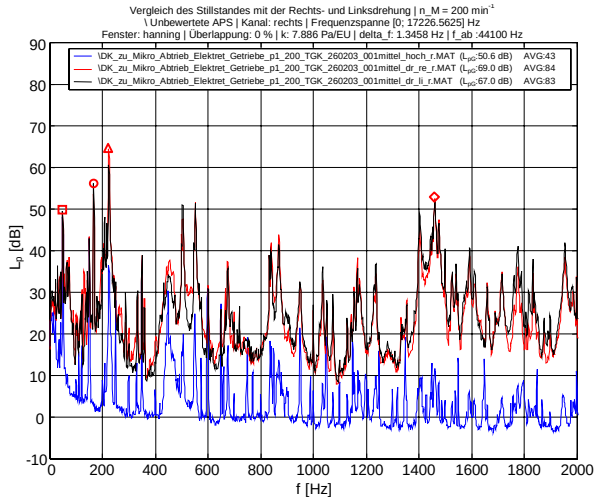
a)



b)



c)



d)

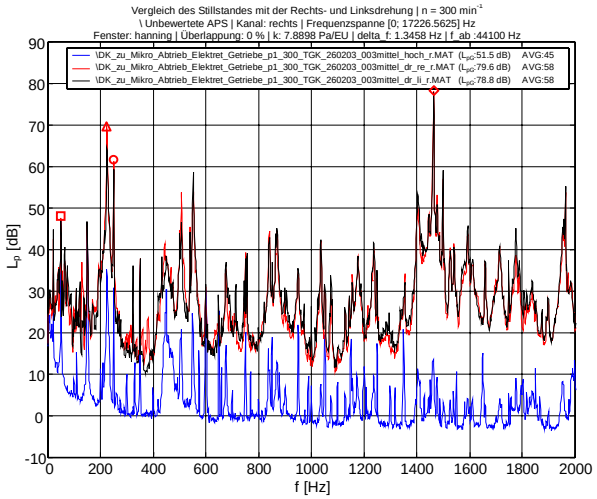


Abbildung 15.14: Aufstellung der Ausschnitte von 0 bis 2000 Hz der Autopowerspektren aus den Abbildung 15.10 bis Abbildung 15.13:
a) n_M = 100 min^{-1}, b) n_M = 150 min^{-1}, c) n_M = 200 min^{-1}, d) n_M = 300 min^{-1}
Zeichenlegende: □ 50 Hz Brummen des Netzes, △ Peak bei 225 Hz, ○ Drehzahlabhängiger Peak, ◇Pegel in der Nähe von 1460 Hz.

In allen Diagrammen der Abbildung 15.14 treten Peaks bei 225 Hz und in der Nähe von 1460 Hz deutlich hervor. Des Weiteren erscheint neben eines drehzahlabhängigen Peaks in jedem Diagramm (vgl. Abbildung 15.17) auch ein Signal bei 50 Hz. Ein Vergleich der Rechtsdrehung des Drehkanals der Messreihe 190203-003 (offener Kanal) und der Reihe 260203-002 (geschlossener Kanal), wie in Abbildung 15.15 dargestellt ist, zeigt, dass die Peaks bei 225 Hz (1) nur bei dem durch Holzplatten geschlossenen Kanal auftreten.

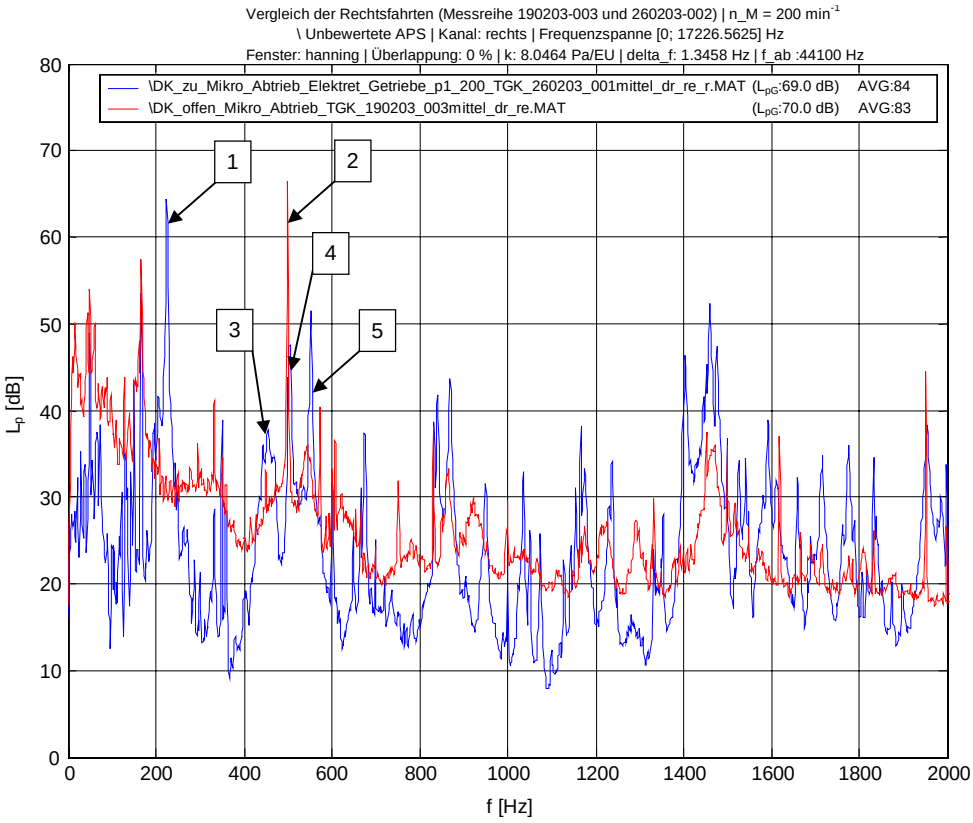


Abbildung 15.15: Vergleich der Rechtsdrehung des offenen (rot) und des geschlossenen (blau) Drehkanals. Schrittmotordrehzahl n_M = 200 min^{-1}.

Gleiches gilt im Bereich von 500 Hz bis 550 Hz. Dort sind bei geschlossenem Drehkanal ebenfalls verstärkte Pegel zu entdecken ((3), (4) und (5)). Der Peak bei 500 Hz (2) ist bei geschlossenem Drehkanal ebenfalls vorhanden, jedoch in sehr abgeschwächter Form. Die aufgeführten Eigenschaften bei 225 Hz, 550 Hz und 1460 Hz sind für eine spätere Beurteilung der Terzspektren von Bedeutung, weil, wie noch gezeigt wird, die Terzbänder dieser Bereiche maßgeblich durch diese Pegel beeinflusst werden.

Auch im Stillstand des Drehkanals erscheint der Peak bei 225 Hz nur beim geschlossenen Kanal ((1) in Abbildung 15.16).

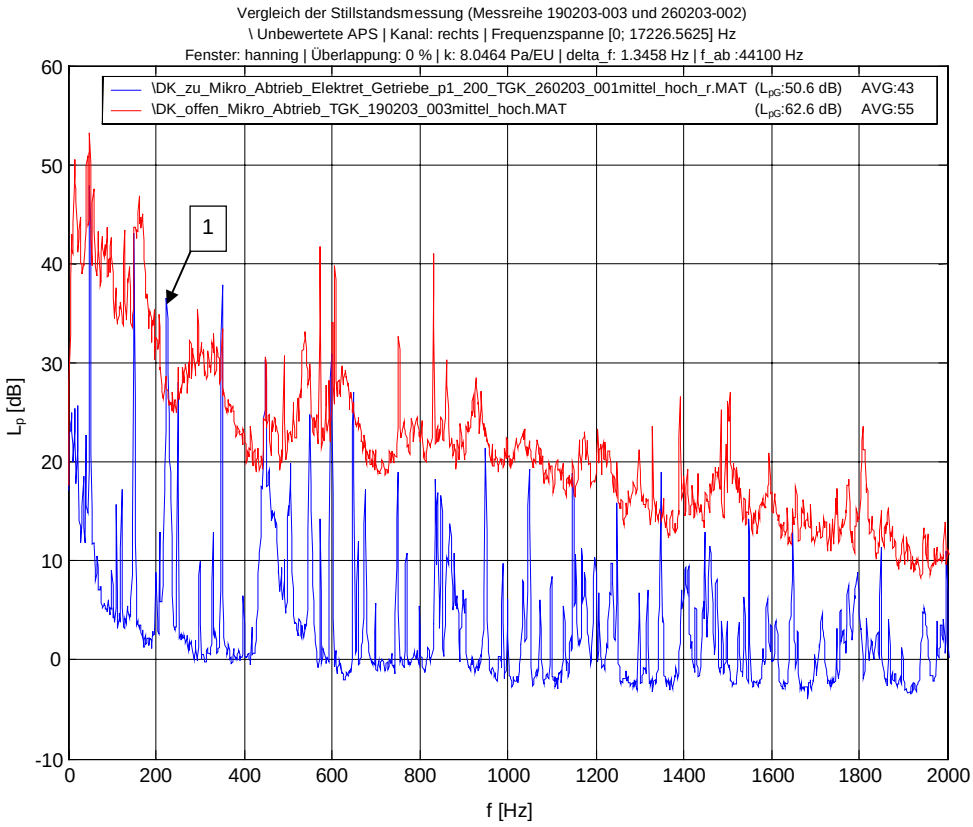


Abbildung 15.16: Vergleich der Autopowerspektren der Messungen in einem offenen (rot) und in einem geschlossenen (blau) Drehkanal im Stillstand.

Bei einem direkten Vergleich der Autopowerspektren aller Messungen bei verschiedenen Drehgeschwindigkeiten im Frequenzbereich von 0 bis 300 Hz (Abbildung 15.17) werden die drehzahlabhängigen Pegel deutlich (vgl. Abbildung 15.14).

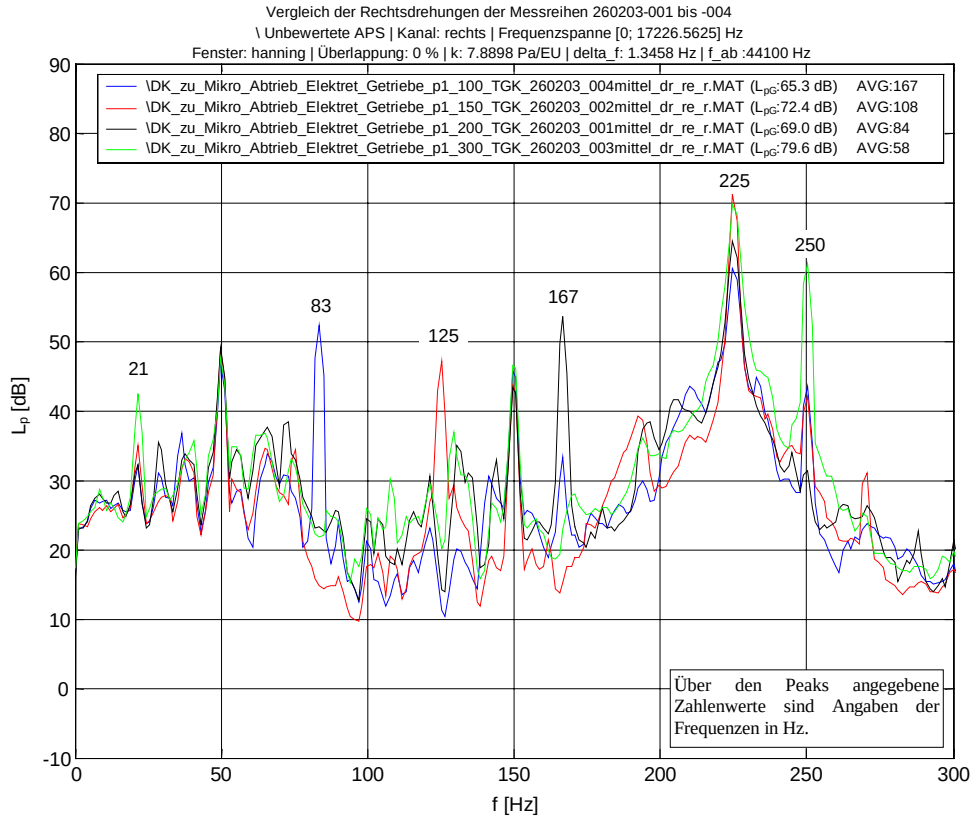


Abbildung 15.17: Gegenüberstellung der Rechtsdrehungen bei unterschiedlichen Drehzahlen: blau: 100 min^{-1}, rot: 150 min^{-1}, schwarz: 200 min^{-1}, grün: 300 min^{-1}.

Dividiert man die Frequenzen der Peaks aus Abbildung 15.17 durch die zugehörige Drehfrequenz f_M des Schrittmotors, so erhält man einen gemeinsamen Quotienten Q (Tabelle 15.2). Daraus lässt sich folgender Zusammenhang bilden:

$$f_n = \frac{n_M}{60} \cdot 50 \qquad (15.1)$$

f_n drehzahlabhängige Frequenz [Hz]
n_M Drehzahl des Schrittmotors [min^{-1}]

[min^{-1}] **n_M**	**[Hz]** **f_M**	**[Hz]** **f_n**	**[1]** **Q**
100	1,67	83	49,7
150	2,5	125	50
200	3,33	167	50,2
300	5	250	50

Tabelle 15.2: Berechnung des Quotienten Q.

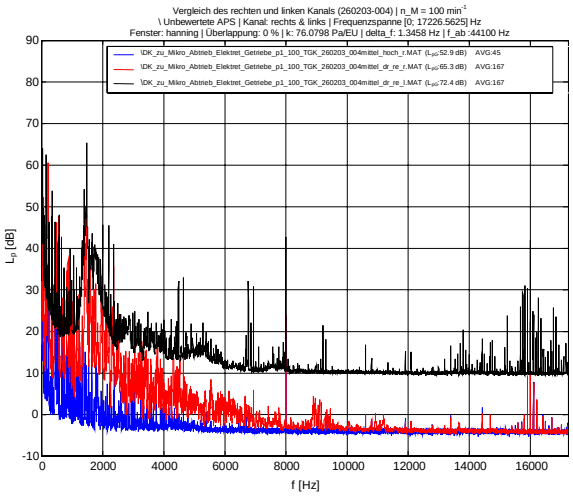
[min^{-1}] n_M	[Hz] f_n
100	83,3
150	125
200	166,7
300	250

Tabelle 15.3: Mit Gl. (15.1) berechnete Frequenzen f_n in Abhängigkeit der Schrittmotordrehzahl n_M.

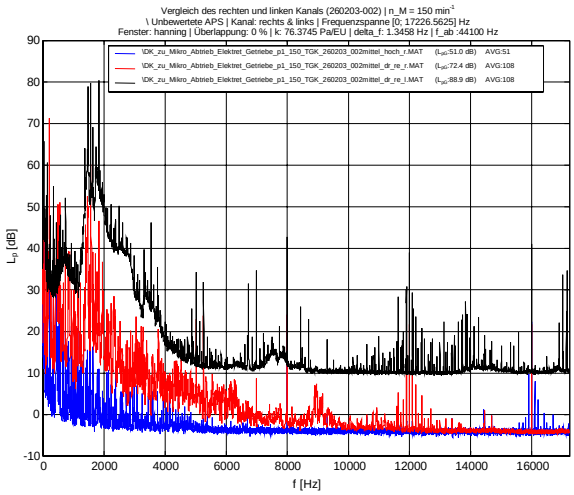
Um die Pegel in der Nähe von 1460 Hz näher zu betrachten, werden in der nächsten Diagrammübersicht die Autopowerspektren des rechten und linken Kanals einander gegenübergestellt. In diesem Zusammenhang ist zu sagen, dass die Pegel des am linken Kanal angeschlossenen Elektretmikrofons keine vergleichbaren Werte darstellen, da das Mikrofon an diesem Kanal neben Luftschall auch Körperschall empfangen hat. Für den hier angestellten Vergleich ist dies in soweit tragbar, als dass aus ihm nur Zusammenhänge zwischen den auftretenden Frequenzen ermittelt werden sollen.

Die Spektren des linken Kanals in der Zusammenstellung in Abbildung 15.18 weisen im Bereich von etwa 1000 Hz bis 3000 Hz deutlich gestiegene Pegel auf. Bei näherer Betrachtung (Abbildung 15.19, S. 153) sind die Charakteristika der Spektren des rechten und des linken Kanals im Frequenzbereich von etwa 1400 Hz bis ungefähr 1550 Hz miteinander in Verbindung zu bringen, jedoch ohne explizite Überdeckungen von Frequenzen. Allen Spektren, des rechten und des linken Kanals, ist die Bildung eines Pegelscheitelpunktes in der Umgebung von 1460 Hz gemein. Aus Abbildung 15.15 geht diesbezüglich hervor, dass diese Pegel bei geschlossenem Drehkanal besonders ausgeprägt sind. Dies deutet darauf hin, dass die Ursache der Drehkanalantrieb ist, aber die Wirkung durch den Verschluss mit den Holzplatten verstärkt wurde.

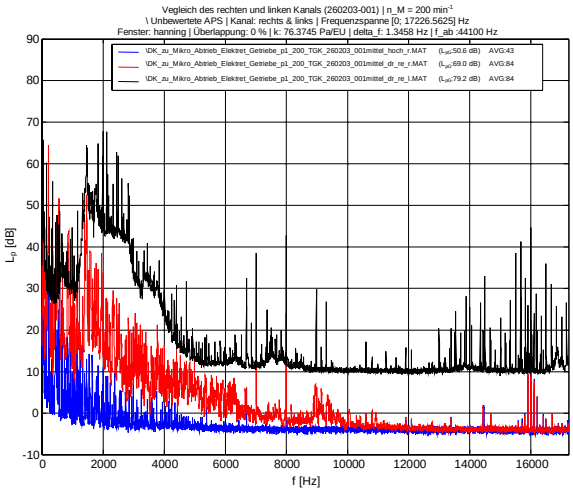
a)



b)



c)



d)

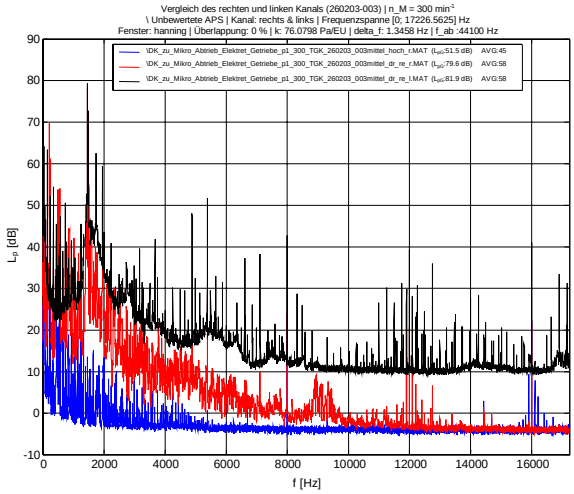
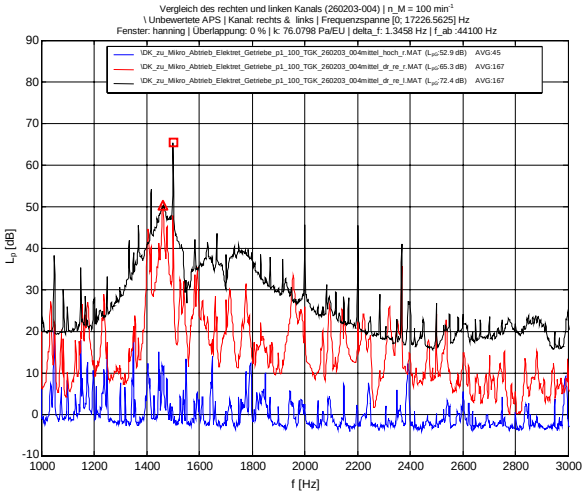
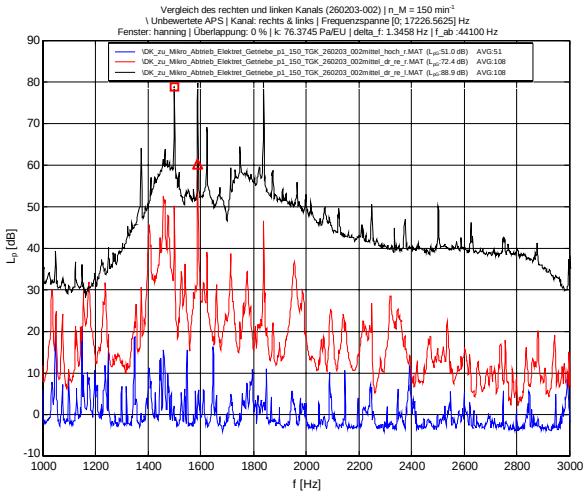


Abbildung 15.18: Aufstellung der Autopowerspektren vom rechten und linken Kanal der Messreihe 260203: a) $n_M = 100\ min^{-1}$, b) $n_M = 150\ min^{-1}$, c) $n_M = 200\ min^{-1}$, d) $n_M = 300\ min^{-1}$, Mikrofon im Kanal: blau: Stillstandsmessung, rot: Rechtsdrehung, Mikrofon am Getriebe: schwarz (Rechtsdrehung).

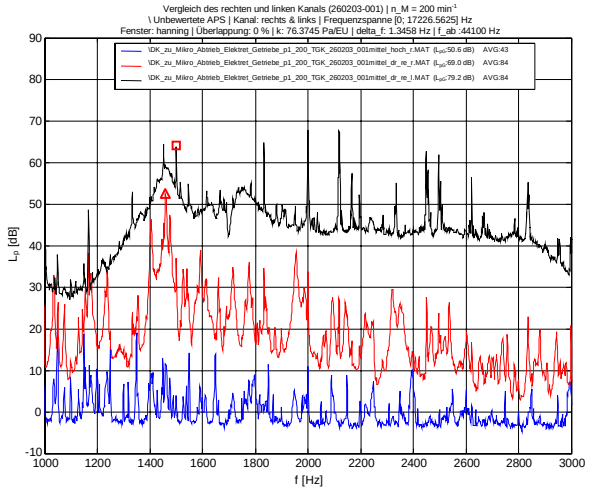
a)



b)



c)



d)

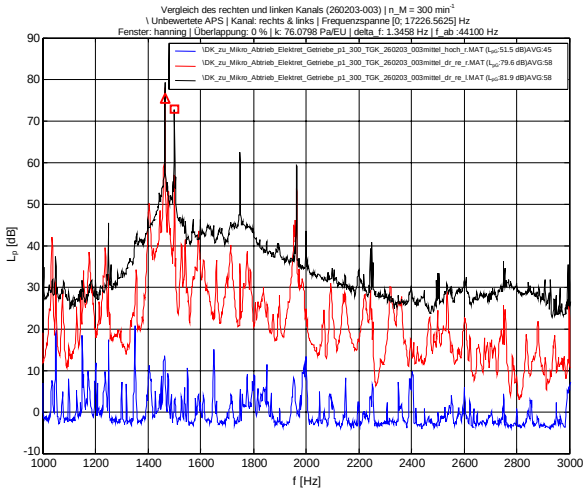


Abbildung 15.19: Aufstellung der Autopowerspektren vom rechten und linken Kanal der Messreihe 260203 im Bereich von 1000 Hz bis 3000 Hz:
a) n_M = 100 min^{-1}, b) n_M = 150 min^{-1}, c) n_M = 200 min^{-1}, d) n_M = 300 min^{-1},
Mikrofon im Kanal: blau: Stillstandsmessung, rot: Rechtsdrehung,
Mikrofon am Getriebe: schwarz: Rechtsdrehung,
□ Pegel bei 1500 Hz (Kanal links), △ max. Pegel des Drehkanalsignals im angezeigten Frequenzbereich.

15.4.2 Untersuchung im Zeitbereich

Während im Frequenzbereich nach einer Mittelung über der Zeit momentane Ereignisse, wie die Schalteraktivitäten, während der Messfahrt herausgemittelt werden, fallen sie bei einer Betrachtung von Zeitverläufen deutlich auf. Dieser Sachverhalt wurde schon in Abschnitt 15.3 erwähnt. Dennoch bietet sich eine genauere Untersuchung des Zeitbereiches an, um weitere Anzeichen von vermeidbaren Störungen zu finden. Diese Analyse wurde am Beispiel der Messreihe 260203-001 durchgeführt. Das Autopowerspektrum dieser Messreihe ist in Abbildung 15.12 dargestellt.

Der zeitliche Verlauf des Gesamtschalldruckpegels dieser Messreihe in Abbildung 15.20 weist mehrere momentane Pegelerhöhungen auf. Die bereits erwähnten Schalterpegel sind bei der Linksdrehung (rote Kurve) gut zu sehen (1).

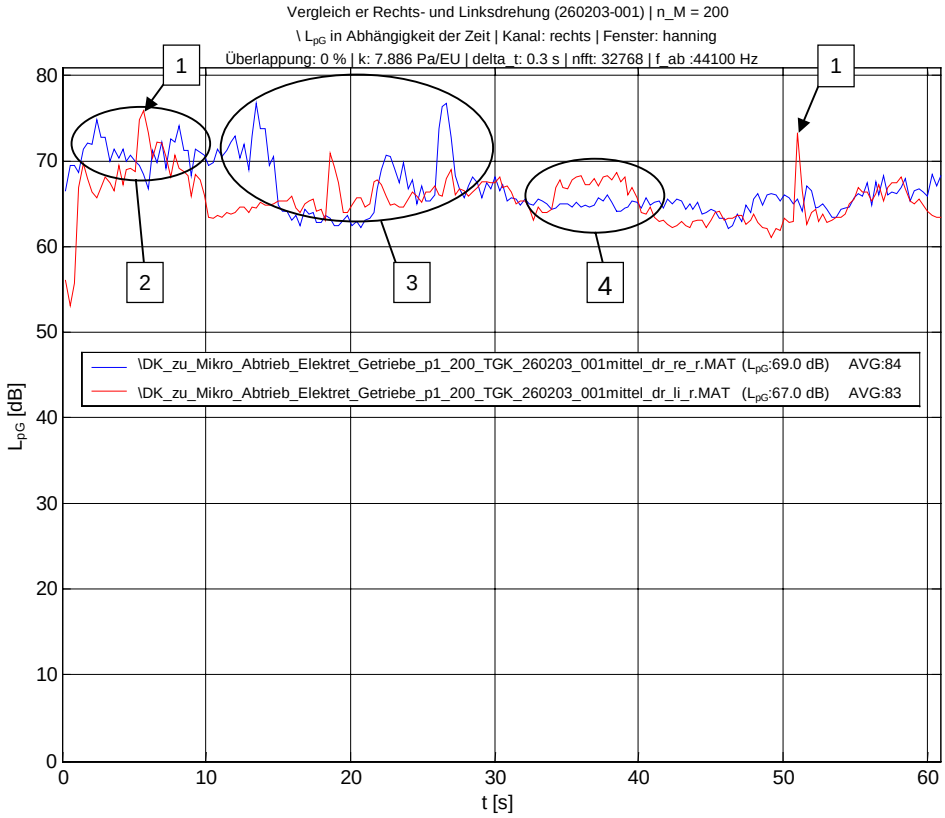


Abbildung 15.20: Vergleich der Zeitverläufe des Gesamtschalldruckpegels einer Rechts- und einer Linksdrehung: blau: Rechtsdrehung, rot: Linksdrehung.

In den Bereichen (2), (3) und (4) sind jedoch weitere Ausschläge vorhanden, die keiner Schalteraktivität zugeordnet werden konnten. Mit Hilfe von Hörproben konnten die Pegel der drei Bereiche getrennt werden. Während die Pegel des Bereiches (2) stets beim Anfahren des

Drehkanals zu hören waren, erschienen die Ausschläge wie in den Bereichen (3) und (4) nicht bei jeder Fahrt, und dann auch nicht zu reproduzierbaren Zeitpunkten. Bezüglich der Pegel im Bereich (2) ist es denkbar, dass sich beim Anfahren die Relativposition zwischen den Zahnriemenflanken und den Flanken der Zahnscheibe am Drehkanal ruckartig geändert hat. Demzufolge muss sich die Lage bei jeder Drehrichtungsänderung ändern, womit erklärt ist, warum diese Geräusche bei jeder Messfahrt zu sehen waren. Hinter den Geräuschen in den Bereichen (3) und (4) können dagegen verschiedene Ursachen stehen:

- Geräusche durch das Anlaufen des Riemens am Bord der Spannrollen,
- Aufschlagen oder Verrutschen des Mikrofonkabels auf dem Drehkanal,
- Zahnriemengeräusche.

Neben den Signalen, die durch die Mechanik entstanden, fällt in der Analyse der Messdaten ein weiteres Phänomen auf, das bei fehlender Kenntnis über seine Ursache zu Fehlbeurteilungen der Diagramme führen kann. In Abbildung 15.21 weist die erste Stillstandsmessung (blaue Kurve) eine Pegelspitze direkt zu Beginn der Messung auf. Durch die Hörproben konnte festgestellt werden, dass es sich darum um verbliebene Reste aus dem Puffer des PCs handelte. Dieses Problem trat unregelmäßig bei verschiedenen Messpunkten auf.

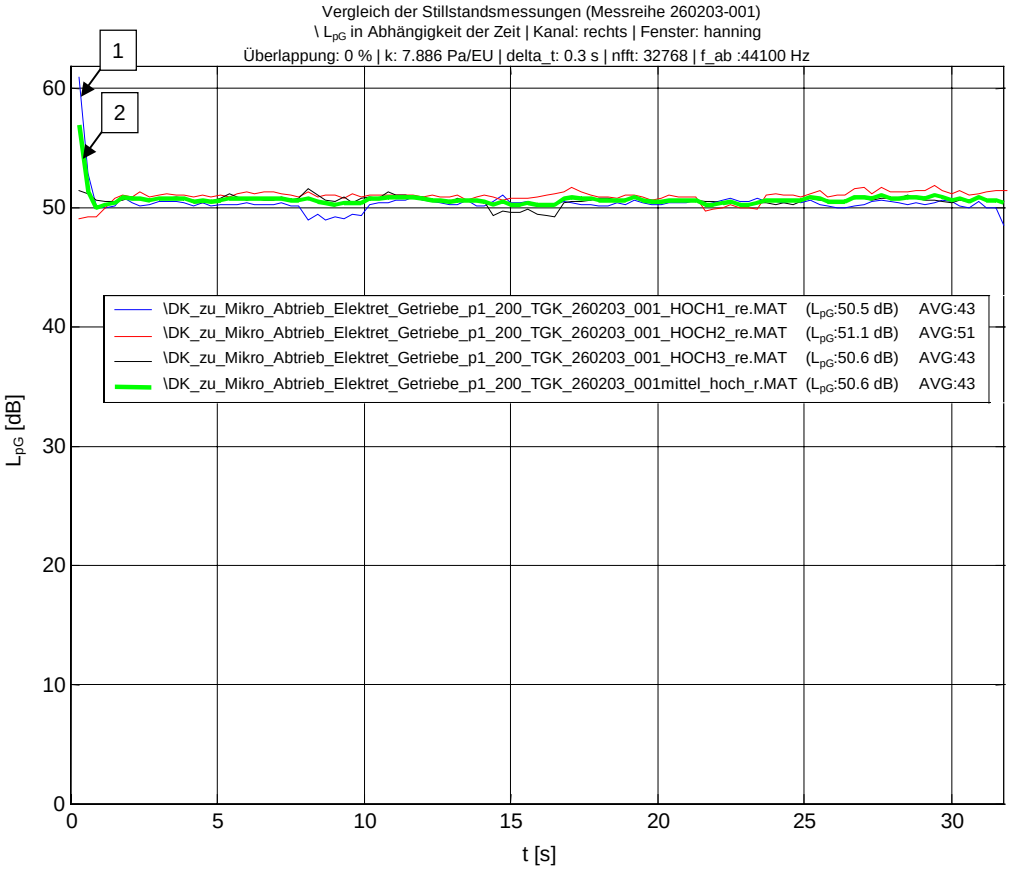


Abbildung 15.21: Zeitlicher Verlauf des Gesamtschalldruckpegels von drei Stillstandsmessungen (Kurven in blau, rot und schwarz) und der gemittelte Verlauf (grüne Kurve).

15.5 Vergleich der Spektren des Drehkanals mit denen eines Ventilators

Die Pegel des Drehkanals müssen während der akustischen Messung in jedem Terzband mindestens 10 dB niedriger als die eines betriebenen Ventilators sein. Dies soll in diesem Abschnitt zunächst anhand der Messreihe 260203-001 untersucht werden, weil in dieser Messreihe mit der verlangten Messgeschwindigkeit von einer Kanalumdrehung pro Minute gefahren wurde. Im Nachfolgenden werden die Autopowerspektren und die Zeitverläufe der Gesamtschalldruckpegel der Stillstandsmessung und der Rechts- bzw. der Linksdrehung aufgeführt. Im Diagramm des Terzspektrums ist zum Vergleich das Terzspektrum des Vergleichsventilators mit aufgeführt.

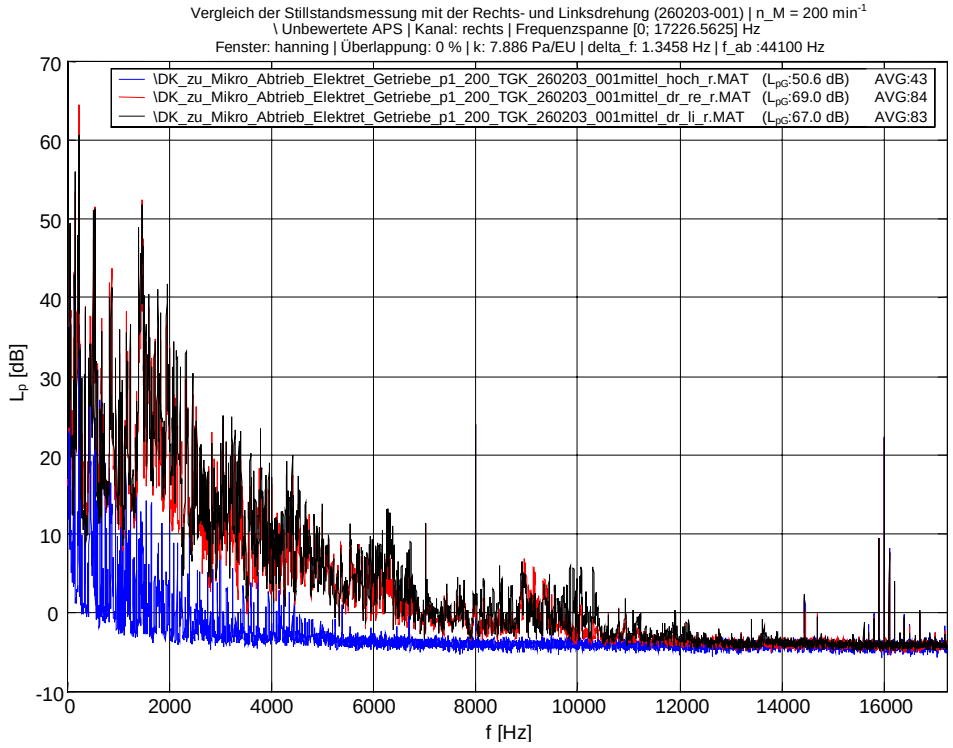


Abbildung 15.22: Autopowerspektren der Stillstandsmessung (blau) und der Rechts- und Linksdrehung des Drehkanals (rot und schwarz) bei einer Schrittmotordrehzahl von 200 min^{-1}.

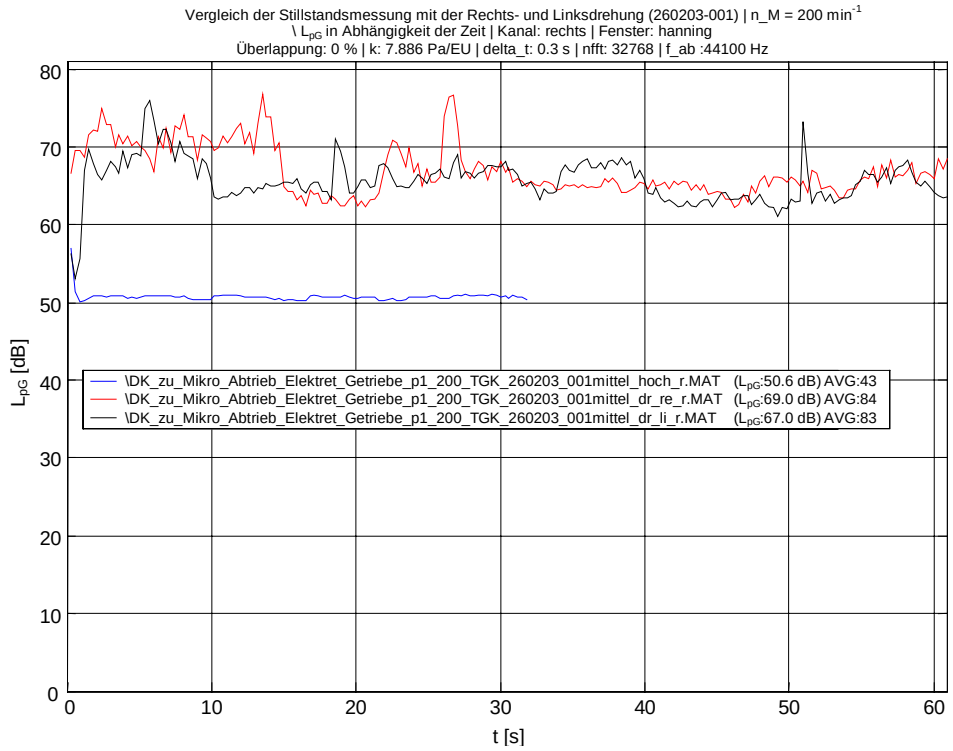


Abbildung 15.23: Darstellung des Zeitverlaufes des Gesamtschalldruckpegels im Stillstand (blau), bei der Rechtsdrehung (rot) und bei der Linksdrehung (schwarz); n_M = 200 min^{-1}.

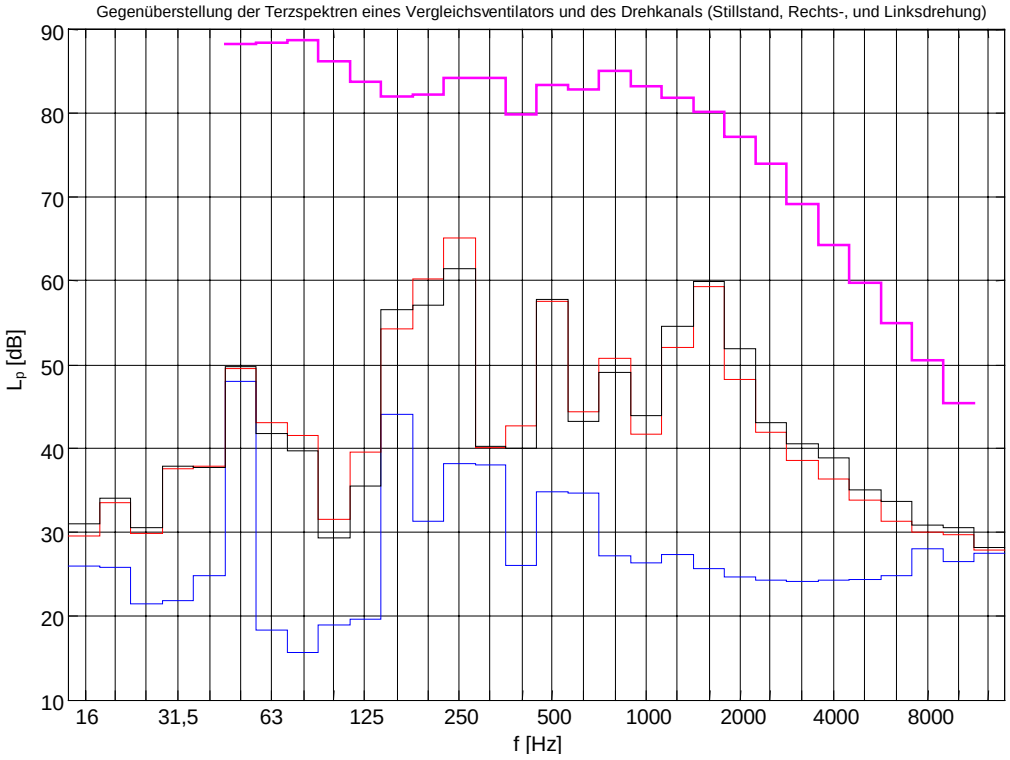


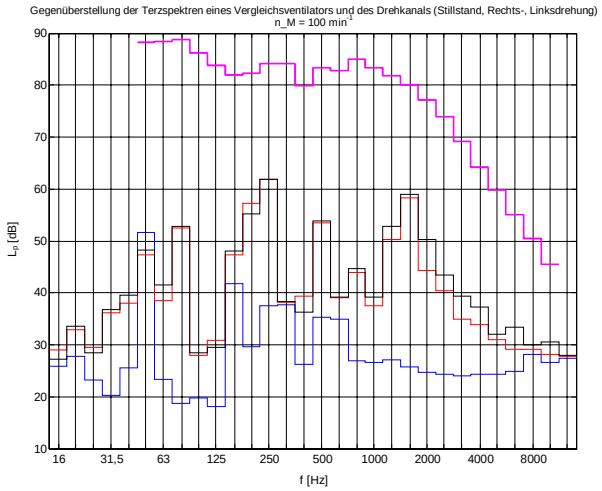
Abbildung 15.24: Gegenüberstellung der Terzspektren eines Vergleichsventilators und des Drehkanals. Die zugehörigen Autopowerspektren des Drehkanals zeigt Abbildung 15.22; Ventilatordaten s. Tabelle 15.1; magenta: Vergleichsterzspektrum bei n = 1400 min^{-1} aufgenommen; blau: Drehkanalstillstand; rot: Rechtsdrehung des Drehkanals; schwarz: Linksdrehung des Drehkanals.

Aus Abbildung 15.24 ist zu erkennen, dass die Terzbandpegel des Drehkanals stets mehr als 15 dB unterhalb der Pegel des Vergleichsventilators liegen. In der nachfolgenden Diagrammzusammenstellung werden die bei unterschiedlichen Motordrehzahlen n_M aufgenommenen Terzspektren des Drehkanals dem Terzspektrum des Vergleichsventilators einander gegenübergestellt.

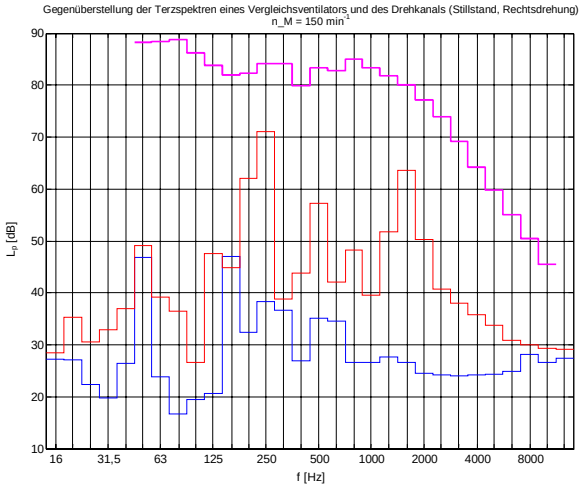
Messreihe 260203-	**[min^{-1}] n_M**	**[dB] Stillstand**	**[dB] Rechts-drehung**	**[dB] Links-drehung**
004	100	52,6	65,3	65,6
002	150	50,9	72,4	-
002	200	50,6	68,1	66,7
003	300	51,1	79,5	78,7

Tabelle 15.4: Gesamtschalldruckpegel der Terzspektren des Drehkanals in Abbildung 15.25.

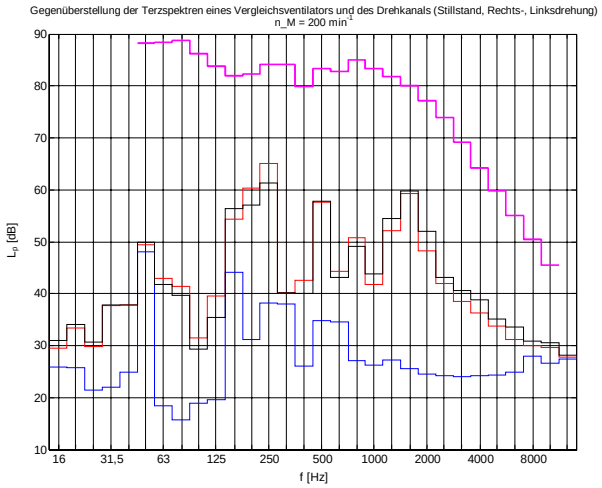
a)



b)



c)



d)

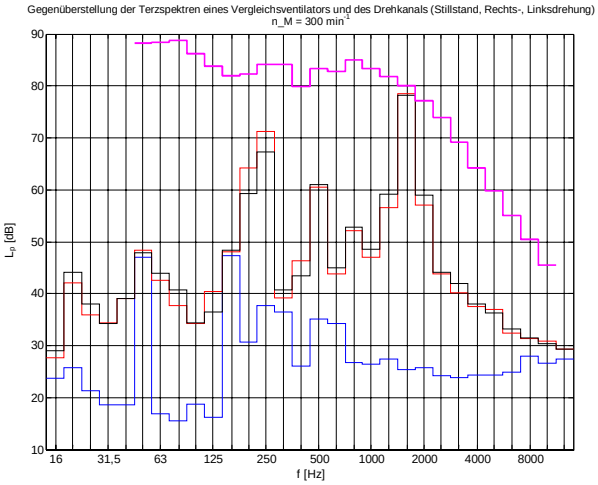


Abbildung 15.25: Zusammenstellung der Terzspektren:
a) n_M = 100 min^{-1}; b) n_M = 150 min^{-1}; c) n_M = 200 min^{-1}; d) n_M = 300 min^{-1}.
Dargestellt sind die über die jeweilige Messreihe gemittelten Terzspektren (vgl. Abschnitt 15.1, S.135).

Das Diagramm in Abbildung 15.26 zeigt auf Grundlage der Information aus Abbildung 15.25 den Abstand zwischen den Terzbändern des Vergleichsventilators und des Drehkanals.

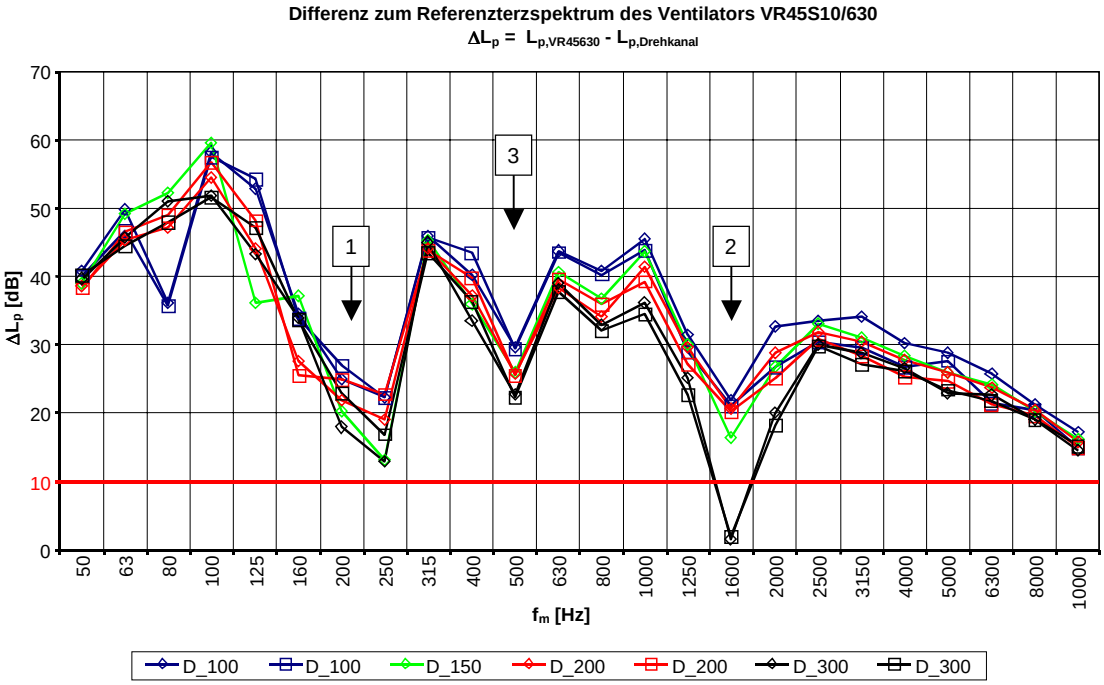


Abbildung 15.26: Pegeldifferenz der Terzbänder des Drehkanals zum Terzband des Vergleichsventilators.

Nach Abbildung 15.26 ist der Pegelabstand bei allen Drehgeschwindigkeiten bis auf 300 min^{-1} größer als 10 dB. Die markanten Einschnitte in den Terzspektren an den Stellen (1), (2) und (3) sind auf die in Abschnitt 15.4.1 (vgl. Abbildung 15.15, S. 148) beschriebenen Pegelspitzen zurückzuführen.

15.6 Auswerteergebnisse

Die Auswertung zeigt, dass es bei Betrieb des Drehkanals zu diversen störenden Einflüssen kommen kann. Es ist jedoch zu beachten, dass einige Störungen mit sehr großer Wahrscheinlichkeit durch den Messaufbau begünstigt, wenn nicht gar verursacht wurden. Der Messaufbau wies diesbezüglich insbesondere die folgende Schwachstelle auf:

- Abschluss des Drehkanals durch Holzplatten,
  statt einer langen Rohrleitung mit reflexionsarmen Kanalabschlüssen wurde somit nur ein kurzer geschlossener Kanal (Drehkanal) von 0,76 m Länge verwendet. Durch diese Schallharten Abschlüsse konnte es sehr wahrscheinlich zu den beschriebenen Erscheinungen bei 225 Hz, 550 Hz und 1460 Hz kommen.

Geht man davon aus, dass beim Einbau des Drehkanals in den Kanalprüfstand diese Schwachstelle beseitigt wird, so wurden die analysierten Daten unter den ungünstigsten Bedingungen gewonnen. Im Folgeschritt bedeutet dies, dass der Schalldruckpegelabstand zum Vergleichsventilator im Kanalprüfstand größer sein muss (vgl. Abbildung 15.25 und Abbildung 15.26). Die Auswertung macht zudem deutlich, dass die zu realisierende Drehzahl in beide Richtungen begrenzt wird. Niedrige Drehzahlen verbessern auf der einen Seite die Mittelung, durch eine größere Werteanzahl, erfordern allerdings eine erhöhte Speicherkapazität. In den Versuchen kam es immer wieder zu Problemen, weil die eingelesenen Daten nicht schnell genug in den Puffer geschrieben werden konnten. Abhilfe schaffte dabei eine Vergrößerung des Puffers (vgl. Abschnitt 9.4.6). Hohe Motordrehzahlen (hier 300 min^{-1}) verstärken den Gesamtschalldruckpegel und ergeben weniger Messwerte, wodurch die Aussagekraft der Mittelung abnimmt.
Eine Motordrehzahl von 200 min^{-1} hat sich hierbei als sinnvoll ergeben. Bei der Verarbeitung der Messdaten traten selten Probleme auf und es ergab sich eine Messzeit von einer Minute. Letzteres erfüllt die Vorgabe nach [11], wonach eine Messzeit von mindestens 30 s vorgeschrieben wird.
Die Problematik, dass der Schalldruckpegelabstand zu klein wird, besteht vor allem dann, wenn der zu untersuchende Ventilator mit niedrigen Drehzahlen betrieben wird. In diesem Fall ist zu prüfen, ob die Grenzfrequenz (Cut-On-Frequenz) im Rohr unterschritten wird. Ist dies der Fall, breiten sich die abgestrahlten Geräusche als ebene Wellen aus, womit eine Rotation des Drehkanals nicht mehr notwendig ist. Die akustischen Messungen können dann

bei festen Mikrofonpositionen erfolgen, ohne dass die Betriebsgeräusche des Drehkanals störend einwirken.

Die nachfolgende Tabelle gibt zusammenfassend eine Übersicht über die erfahrenen Störungen wieder.

Pos.	Störung	Äußerung	Bemerkungen
1	50 Hz und Harmonische	Deutlicher Peak bei 50 Hz und viele Harmonische	Die Maßnahmen zur Beseitigung dieser Einflüsse sind sehr aufwendig. Neben dem Peak bei 50 Hz treten die ungeraden Harmonischen hervor.
2	Modulierte Drehfrequenz	Einzelne Peaks (Abbildung 15.17, S. 150)	Die genaue Herkunft ist unklar, weil diese Erscheinung mit dem Faktor 50 moduliert zu sein scheint. Die Schalldruckpegel sind mit etwa 50 dB (bei 250 Hz auch 60 dB) recht niedrig.
3	Pegel bei 225 Hz	Einzelner Peak mit breiterer Basis (Abbildung 15.17, S. 150)	Gemäß der Auswertung sind diese Pegel durch den Messaufbau bedingt. Sie müssten bei Messungen im Kanalprüfstand deutlich schwächer sein.
4	Pegel bei 550 Hz	Gruppe von drei Peaks (Abbildung 15.15, S. 148)	Vgl. Pos. 3.
5	Pegel bei 1460 Hz	Lokale Pegelanhebung (Abbildung 15.19, S. 153)	Vgl. Pos. 3.
6	Riemen-geräusche	Momentane Pegelanhebungen im Zeitverlauf ($L_{pG}(t)$) (Abbildung 15.20, S. 154)	Die Störungen sind antriebsbedingt.
7	Schalter-geräusche	Momentane Pegelanhebungen im Zeitverlauf ($L_{PG}(t)$) (Abbildung 15.20, S. 154)	Es treten kurzzeitige Pegelerhöhungen auf, die nach der Mittelung entfallen. Abhilfe kann der Einbau kleinerer, leiserer Schalter schaffen.
8	Pufferreste	Pegelanhebung zu Beginn des Zeitverlaufes ($L_{pG}(t)$) (Abbildung 15.21, S. 156)	Abhilfe schaffte eine Korrektur im Mess- und Steuerprogramm.

Tabelle 15.5: Auflistung von Störungen.

16 Anmerkungen und Hinweise

16.1 Line-In-Aussteuerung

Bei der Aufnahme der Kalibriersignale wird empfohlen die Aussteuerung des Line-In-Eingangs mit dem Signal des Pistonphons durchzuführen, wenn bei der Messung mit Pegeln über 114 dB zu rechnen ist.

16.2 Peaks im Autopowerspektrum

Im Labor für Strömungsmaschinen wurden an zwei unterschiedlichen PCs mit baugleicher Soundkarte (TerraTec DMX XFire 1024) zu Testzwecken Kalibriersignale (1000 Hz, 94 dB) über ein Elektretmikrofon aufgenommen In beiden Fällen wiesen die Autopowerspektren Peaks von etwa 22 dB bis 24 dB bei 8000 Hz und 16000 Hz auf. Diese zeigten sich auch später bei den Messungen mit dem B & K-Mikrofon.

16.3 Signalanzeige während der Messfahrt

Die Anzeige des Zeitsignals vor und während der Aufnahme des Kalibriersignals wurde zu Kontrollzwecken vorgesehen und rief beim Ablauf keine größeren Probleme hervor. Für die Messfahrten wurde dies nicht vorgesehen, weil es bei ersten Versuchen, das Frequenzspektrum parallel anzeigen zu lassen, zu Problemen im Programmablauf kam.
Die Messungen im Labor für Strömungsmaschinen wurden durch die parallele Anzeige des Frequenzspektrums auf dem HP-Analysator begleitet. Aus dem nachträglichen Vergleich der Spektren des HP-Analysators und des PCs ging eine gute Übereinstimmung hervor, wodurch die Verlässlichkeit der PC-Aufnahme beschrieben wurde.
Bei Bedarf einer Anzeige des Zeitbereiches während der Messfahrt, wird empfohlen in der Sequenz [4-3-3-1-2], des Programms DK_Messungen_Aufnahme_XXXXXX.vi, das Sub_VI RMS_Wert_aus_Zeitdaten_XXXXXX_TGK.vi einzusetzen. Dieses Sub-VI bietet die Möglichkeit mit wenig Aufwand den Zeitverlauf darzustellen. Dazu sollte jedoch die Effektivwertberechnung aus dem Sub-VI entfernt werden, um Rechenkapazität zu sparen.

16.4 Geräusche des Gestells

Es kann passieren, dass die kurzzeitig auftretenden Beschleunigungskräfte beim Anfahren des Drehkanals zu kleinen Auslenkungen des Gestells führen, wodurch die aufeinanderliegenden Gestellbeine, aufgrund des kleinen Spaltes zwischen ihnen, aufeinander stoßen und Geräusche entwickeln. Um dies zu unterbinden wurde die Antriebsbeschleunigung reduziert. Außerdem ist es möglich, die Profilpaare miteinander über ein Blech zu verschrauben.
Diese Verbindung ist bei einer Höhenverstellung zu lösen.

16.5 Ausgangsposition des Drehkanals

Die Ausgangsposition, die der Drehkanal nach der Referenzzierung einnimmt, ist an die Zugänglichkeit der Mikrofonklappenöffnung, des in den Prüfstand eingebauten Drehkanals, anzupassen. Dazu kann die Position des Auslösers verändert werden.

16.6 Voreinstellungen der Positioniersteuerung

Die Gesamtübersetzung des Drehkanalantriebs beeinflusst die erforderliche Drehzahl des Schrittmotors und die benötigte Anzahl der Motorumdrehungen für eine definierte Drehkanalumdrehung von 1 min^{-1}. Diese Größen wurden in dem Programm mit der Gesamtübersetzung gekoppelt, damit die Zeit für eine Drehkanalumdrehung und die Winkelsteuerung im Programm für den Prüfstand der Firma Pollrich GmbH und des Labors für Strömungsmaschinen gleich ist. Die Beschleunigungswerte, die Endschaltersuchgeschwindigkeit und der Sicherheitsabstand vom Referenzzierschalter bis zum Referenzpunkt wurden als feste Werte vorgegeben (vgl. Abschnitt 9.4.2). Mit diesen Werten funktioniert die Steuerung bei beiden Prüfständen. Aufgrund des konstanten Sicherheitsabstandes ist der überstrichene Winkel vom Referenzzierschalter bis zum Referenzpunkt bei beiden Prüfständen etwas unterschiedlich (Unterschied von ca. 2°).
Für Anwendungen, bei denen die Position des Referenzpunktes entscheidend ist, wird empfohlen, zumindest den Sicherheitsabstand an die Gesamtübersetzung anzupassen. Des Weiteren ist dafür zu sorgen, dass in den Voreinstellungen keine Dezimalzahlen übergeben werden.

16.7 Aufnahmen mit dem Programm DK_Stillstand_Aufnahme_XXXXXX.vi

Bei Aufnahmen mit dem Programm DK_Stillstand_Aufnahme_XXXXXX.vi, die deutlich länger als 1 Minute dauern, kann es zu Stabilitätsproblemen kommen. Abhilfe kann hier eine Vergrößerung der Puffergröße bei der Soundkartenkonfiguration schaffen.

16.8 Spannungsversorgung der Positioniersteuerung

Beim Einschalten ist die 24 V-Spannungsversorgung vor und beim Ausschalten nach der 230 V-Spannungsversorgung einzuschalten, bzw. auszuschalten. Alternativ können auch beide Spannungskreise gleichzeitig ein- und ausgeschaltet werden.
Die Positioniersteuerung sollte nie ohne eingeschalteter 24 V-Spannung betrieben werden.

16.9 Schrittmotordrehzahlen

Es sei vermerkt, dass niedrige Schrittmotordrehzahlen unterhalb von 100 min^{-1} zu erhöhten Vibrationen im Gestell führen. Sollten Drehzahlen in diesem Bereich notwendig sein, ist zu prüfen, ob akustische Messungen während des Drehkanalbetriebs durch diese Vibrationen beeinflusst werden.

17 Zusammenfassung

Die gestellte Aufgabe konnte im Rahmen der Diplomarbeit gelöst werden.
Der Drehkanal und die Antriebseinheit wurden über das Gestell zu einer Einheit verbunden. Zusammen mit dem entwickelten Mess- und Steuerungsprogramm ist es möglich, kontinuierliche Messungen des Schalldruckes entlang eines Umfangs in einer Messebene des Kanals durchzuführen, wie es in der Norm DIN EN 25136 vorgegeben wird. Die aufgezeichneten Daten werden im WAV-Format als Rohdaten abgespeichert. Die Funktion der entwickelten Mess- und Steuerungs- und Auswerteprogramme konnte beim Einsatz an einem baugleichen Industrieprüfstand im Rahmen einer parallel laufenden Diplomarbeit bestätigt werden.
Die Tragfähigkeit der Gestellkonstruktion wurde praktisch und theoretisch nachgewiesen. Durch die Anwendung der FEM konnte darüber hinaus die Notwendigkeit der Entlastungsstütze belegt werden. Das umgesetzte Konzept zur Höhenverstellung des Gestells wurde in einem Test, in dem die Minimal- und Maximalhöhe eingestellt wurden, bestätigt. Über das Gestell lassen sich Drehkanalhöhen zwischen 1400 mm und 2000 mm realisieren.
Im Rahmen der Programmentwicklung unter LabVIEW entstanden ein Mess- und Steuerungsprogramm, das die Akquirierung akustischer Signale während einer Drehkanalumdrehung ermöglicht und ein Programm, das nur zur Aufnahme akustischer Signale per Tastensteuerung dient. Des Weiteren wurden 13 Sub-VIs programmiert, die eine modularisierte Programmierung des Mess- und Steuerungsprogramms, insbesondere hinsichtlich der Kommunikation mit der Positioniersteuerung vereinfachten. Mit Hilfe dieser Sub-VIs ist es außerdem möglich, das Steuerungsprogramm zu erweitern, um es neuen Anforderungen anzupassen.
Im Zuge der Analyse der Betriebsgeräusche des Drehkanals entstanden drei MATLAB-Programme zur Berechnung und Darstellung von Autopowerspektren, von Terzspektren und von zeitlichen Verläufen des Gesamtschalldruckpegels. Das erste Programm analysiert im ersten Schritt die aufgezeichneten Kalibriersignale, berechnet die Kalibrierfaktoren unter Berücksichtigung des Gesamtschalldruckpegels eines definierten Frequenzbereiches und legt diese in einer Textdatei ab. Auf diese Textdatei greift das Analyseprogramm zu und wendet die Kalibrierfaktoren auf die zu analysierenden Rohdaten an, bevor die Analyseergebnisse in eine Ergebnisdatei geschrieben werden. Das dritte Programm ermöglicht das Einlesen dieser Ergebnisdateien zur grafischen Darstellung der enthaltenen Diagramme.
Auf diesen Programmen kann im Hinblick auf die Bestimmung der Schallleistung, der zu untersuchenden Ventilatoren, aufgebaut werden.

Die Auswertung der Betriebsgeräusche des Drehkanals zeigten, dass die Schalldruckpegel der Terzbänder (16 Hz bis 10000 Hz) des Antriebsgeräusches, bei einer Schrittmotordrehzahl von 200 min^{-1} und den Bedingungen des Versuchsaufbaus, mehr als 15 dB unter denen eines Vergleichsventilators liegen. Damit ist der verlangte Abstand von mindestens 10 dB in jedem Terzband erfüllt.

18 Literaturverzeichnis

[1] Alpha: Alpha Getriebebau GmbH, URL: http://www.alphagetriebe.de.

[2] BRECO Zahnriemen: URL: http://www.breco.de.

[3] Berger, Ch.: Objektorientierte Programmierung einer aeroakustischen Messdatenerfassung, Diplomarbeit, Fachhochschule Düsseldorf, Labor für Strömungsmaschinen, Dezember 2001.

[4] Berger, J.: Technische Mechanik für Ingenieure, Bd. 1 Statik, Vieweg-Verlag, Braunschweig / Wiesbaden, 1991.

[5] Berger, J.: Technische Mechanik für Ingenieure, Bd. 2 Festigkeitslehre, Vieweg-Verlag, Braunschweig / Wiesbaden, 1994.

[6] Bommes, L, Fricke, J., Klaes K.: Ventilatoren, Vulkan-Verlag, Essen, 1994.

[7] Bommes, L., Reinartz, D.: Messen, Normieren und Vorausberechnen des Geräusches von Ventilatoren, Fachhochschule Düsseldorf, Labor für Strömungsmaschinen, 1995.

[8] Brüel & Kjær: Handbuch Teil 2, Einkanal-Echtzeit-Frequenzanalysator 2123, Zweikanal-Echtzeit-Frequenzanalysator 2133, 1990.

[9] Decker: Maschinenelemente, 14. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 1998.

[10] DIN 4113 Teil 1: Aluminiumkonstruktionen unter vorwiegend ruhender Belastung, Beuth Verlag, Mai 1980.

[11] DIN EN 25136: Bestimmung der von Ventilatoren in Kanäle abgestrahlten Schallleistung, Beuth Verlag, Februar 1994.

[12] DIN EN 61260: Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven, Beuth Verlag, März 2003.

[13] DIN EN ISO 266: Normfrequenzen, Beuth Verlag, August 1997.

[14] Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, 19. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1997.

[15] Eggert, R.: Objektorientierte Programmierung eines 2-Kanal Frequenzanalysators unter DASYLab und LabVIEW, Diplomarbeit, Fachhochschule Düsseldorf, Labor für Strömungsmaschinen, Juni 2000.

[16] Fritscher, T., Zammert, W.-U.: FEM-Praxis mit ANSYS, Vieweg-Verlag, Braunschweig / Wiesbaden, 1993.

[17] Gieck, K. und R.: Technische Formelsammlung, 29. Auflage, Gieck Verlag, Germering, 1989.

[18] Henn, H., Sinambari, G.R., Fallen, M.: Ingenieurakustik, Vieweg-Verlag, Braunschweig / Wiesbaden, 1984.

[19] Hewlett Packard: Test- und Messtechnik Katalog, 1991.

[20] Hoischen, H.: Technisches Zeichnen, 27. Auflage, Cornelsen Verlag, Berlin, 1998.

[21] item: item MB Systembaukasten, Katalog der item Industrie und Maschinenbau GmbH, Ausgabe März 2001.

[22] Jamal, R.: LabVIEW - Das Grundlagenbuch, 3. Auflage, Addison-Wesley Verlag, München, 2001.

[23] Kameier, F., Reinartz, D.: Vorlesungsskript Strömungsakustik, Fachhochschule Düsseldorf, Labor für Strömungsmaschinen, 2001.

[24] Lips, W.: Strömungsakustik in Theorie und Praxis, 2. Auflage, expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1997.

[25] Mulco: Gesamtkatalog, 3. Auflage, 2002.

[26] Müller BBM: Benutzerhandbuch Teil 2, PAK, Pegelmessung, Version 4.1.

[27] Müller, G.; Groth, C.: FEM für Praktiker – Band 1: Grundlagen, 5. Auflage, Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 2000.

[28] ONTRAK CONTROL SYSTEMS INC. URL: http://www.ontrak.net/labview.htm, Kanada.

[29] Previti, D.: Objektorientierte Programmierung eines Ventilatorenprüfstandes zur aeroakustischen Leistungsvermessung, Diplomarbeit, Fachhochschule Düsseldorf, Labor für Strömungsmaschinen, Mai 2003.

[30] Randall, R.B.: Frequency Analysis, 3rd edition, Brüel & Kjær, Glostrup Sept. 1987.

[31] Roloff / Matek: Maschinenelemente, 13. Auflage, Vieweg-Verlag, Braunschweig / Wiesbaden, 1994.

[32] Rummich, E.: Elektrische Schrittmotoren und –antriebe, 2. Auflage, expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1995.

[33] SIG Positec: SIG Positec Automation Einkaufskatalog, April 1998.

[34] SIG Positec: Technische Dokumentation – Serielle Schnittstelle, Ausgabe: -000, 09.00.

[35] SIG Positec: Technische Dokumentation – TL CT, Ausgabe: b121, 04.01.

[36] SIG Positec: Technische Dokumentation – TLC51x, Ausgabe: c325, 25.10.00.

[37] Stelzmann, U.; Groth, C.; Müller, G.: FEM für Praktiker – Band 2: Strukturdynamik, expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 2000.

19 Symbolverzeichnis

A	Querschnittsfläche der item-Profile	[mm^2]
a_a	Achsabstand des Riemenantriebs	[mm]
d_0	Wirkkreisdurchmesser	[mm]
d_k	Kopfkreisdurchmesser	[mm]
d_{Sp}	Abstand zwischen den Halterungen der Spannrollen	[mm]
F	allgemein: Kraft	[N]
f	Frequenz, speziell: Eigenfrequenz des gespannten Riemens	[Hz]
F_{1D}	Gewichtskraft des Stahlwinkels des Drehkanals auf der Antriebsseite	[N]
F_{2D}	Gewichtskraft des Drehflansches auf der Antriebseite	[N]
F_{3D}	Gewichtskraft des Absatzes der Zahnscheibe	[N]
F_{4D}	Gewichtskraft des Zahnkranzes der Zahnscheibe	[N]
F_{5D}	Gewichtskraft des Drehkanalrohres	[N]
F_{6D}	Gewichtskraft des Stahlwinkels des Drehkanals auf der Abtriebsseite	[N]
F_{7D}	Gewichtskraft des Drehflansches auf der Abtriebsseite	[N]
F_{AD}	Auflagerkraft des Drehkanals am Lager A	[N]
F_{BD}	Auflagerkraft des Drehkanals am Lager B	[N]
$f_{Mikrofon}$	mit dem Mikrofon aufgezeichnete Eigenfrequenz des gespannten Riemens	[Hz]
F_U	Umfangskraft	[N]
F_V	Riemenvorspannkraft	[N]
$F_{V,\ Mikrofon}$	aus $f_{Mikrofon}$ berechnete Riemenvorspannung	[N]
$F_{V,\ Vibrometer}$	aus $f_{Vibrometer}$ berechnete Riemenvorspannung	[N]
$F_{V,Dehnung}$	aus ε berechnete Riemenvorspannung	[N]
$f_{Vibrometer}$	mit dem Vibrometer aufgezeichnete Eigenfrequenz des gespannten Riemens	[Hz]
F_W	radiale Wellenkraft	[N]
F_x	Kraft entlang der lokalen x-Achse	[N]
F_y	Kraft entlang der lokalen y-Achse	[N]
F_z	Kraft entlang der lokalen z-Achse	[N]
F_Z	Zugkraft im Trum des Zahnriemens	[N]

F_{zul}	zulässige Seilzugkraft	[N]
I	Flächenträgheitsmoment der item-Profile	[cm^4]
i	Bezugsradius	[mm]
i_{ges}	Gesamtübersetzung des Drehkanalantriebs	
l	Bezugsriemenlänge	[m]
L_B	Länge des Zahnriemens	[mm]
l_k	Knicklänge	[mm]
l_T	schwingungsfähige Trumlänge	[mm]
M	allgemein: Drehmoment	[Nm]
m	spezifische Riemenmasse	[kg/m]
M_1	Drehmoment des Antriebs	[Nm]
M_b	Biegemoment	[Nmm]
M_x	Drehmoment um die lokale x-Achse	[Nmm]
M_y	Drehmoment um die lokale y-Achse	[Nmm]
M_z	Drehmoment um die lokale z-Achse	[Nmm]
n	Drehzahl	[min^{-1}]
$Rp_{0,2}$	Streckgrenze der item-Profile	[N/mm^2]
S	Sicherheit gegenüber der Streckgrenze	
t	Teilung des Zahnriemens	[mm]
W	Widerstandsmoment der item-Profile	[cm^3]
z	Anzahl der Zähne der Zahnscheibe	
z_B	Anzahl der Zähne des Riemens	
z_e	im Eingriff befindliche Zähne	
Δl	Riemendehnung	[mm]
ε	spezifische Riemendehnung	[mm/m]
λ	Schlankheitsgrad	
σ_b	Biegespannung	[N/mm^2]
σ_{zul}	zulässige Spannung	[N/mm^2]
ω	Knickzahl	

Größen der Berechnungsmodelle der manuellen Berechnung

l_1	Länge der Längs- und Querträger	[mm]
l_2	Abschnittslänge vom Ursprung des Längsträgers bis zur Anschlussstelle des ersten Querträgers	[mm]

l_3	Abstand zwischen den beiden Querträgern	[mm]
l_4	letzter Abschnitt auf dem Längsträger	[mm]
F_1	Punktlast auf dem ersten Querträger (Antriebsseite)	[N]
F_2	Punktlast auf dem zweiten Querträger	[N]
F_{mn}	Kraft	[N]
	Index m gibt die Richtung der Kraft an (lokale Achse),	
	Index n gibt den Ort der Kraft an.	
M_{mn}	Moment	[Nmm]
	m, n sind Buchstaben:	
	Index m gibt die Richtung des Moments an (lokale Achse),	
	Index n gibt den Ort des Moments an.	
	m, n sind Zahlen:	
	Moment aufgrund virtueller Kräfte:	
	Index m gibt die Systemnummer an,	
	Index n gibt Position des Moments an.	
δ_{ik}	virtuelle Verschiebungen:	
	Index i: freier Index	
	Index k: gebundener Index	
X_k	statisch Unbestimmte	
q	Streckenlast	[N/mm]

Größen der Berechnungsmodelle der FEM-Berechnung

l_p	Ersatzlänge für die Profile	[mm]
lst_1	oberer Gestellbeinabschnitt	[mm]
lst_2	zweiter Gestellbeinabschnitt	[mm]
lst_3	dritter Gestellbeinabschnitt	[mm]
lst_4	unterer Gestellbeinabschnitt	[mm]
l_1	Abstand zwischen Keypoint 1 und 2	[mm]
l_2	Abstand zwischen Keypoint 2 und 4	[mm]
l_3	Abstand zwischen Keypoint 4 und 5	[mm]
l_4	Abstand zwischen Keypoint 2 und 3	[mm]
l_5	Abstand zwischen Keypoint 2 und 11	[mm]
l_6	Abstand zwischen Keypoint 11 und 13	[mm]
	Länge der Winkel auf denen der Drehkanal gelagert ist	

l_7	Abstand zwischen Keypoint 13 und 7	[mm]
l_8	Abstand zwischen Keypoint 2 und 12	[mm]
l_{10}	Abstand zwischen Keypoint 25 und 26	[mm]
l_{11}	Abstand zwischen Keypoint 26 und 27	[mm]
l_{12}	Abstand zwischen Keypoint 28 und 27	[mm]
l_{13}	Abstand zwischen Keypoint 29 und 30	[mm]
l_{14}	Abstand zwischen Keypoint 29 und 12	[mm]
	Länge der Entlastungsstütze im Modell	

Akustik

$\tilde{p}$	gemessene Schalldruckamplitude	[EU]
$\tilde{p}_0$	Bezugsschalldruckamplitude	[Pa]
a_i	Frequenzlinie	
A_i	Amplituden im Frequenzspektrum	[EU]
b	Kehrwert der Bandbreitenzahl	
D	Laufraddurchmesser des Vergleichsventilators	[m]
d_2	Rohrdurchmesser (Druckseite)	[m]
f	Frequenz	[Hz]
f_1	untere Bandeckfrequenz	[Hz]
f_2	obere Bandeckfrequenz	[Hz]
f_{ab}	Abtastrate	[Hz]
f_i	Frequenz der Frequenzlinie a_i	[Hz]
f_m	exakte Mittenfrequenz	[Hz]
f_M	Drehfrequenz des Schrittmotors	[Hz]
f_{mn}	Nenn-Terzmittenfrequenz	[Hz]
f_n	von der Schrittmotordrehzahl abhängige Frequenz	[Hz]
f_{om}	Oktavmittenfrequenz	[Hz]
f_r	Referenzfrequenz	[Hz]
G_{10}	Oktav-Verhältnis	
GP	Gesamtpegel	[Pa]
k	Kalibrierfaktor	[Pa/EU]
L_p	Schalldruckpegel	[dB]
$L_{p,HP}$	Schalldruckpegel des Frequenzspektrums	[dB]
	des HP-Analysators	

$L_{p,PAK}$	Schalldruckpegel des Frequenzspektrums des PAK-Systems	[dB]
$L_{p,PC}$	Schalldruckpegel des Frequenzspektrums des PC-Systems	[dB]
L_{pG}	Gesamtschalldruckpegel	[dB]
L_{pK}	Kalibrierschalldruckpegel	[dB]
n	Drehzahl des Vergleichsventilators	$[min^{-1}]$
n_{bit}	Auflösung in Bit	
n_K	Anzahl der Kanäle	
n_M	Schrittmotordrehzahl	$[min^{-1}]$
q	Stufensprung der geometrischen Reihe	
Q	Verhältnis zwischen f_n und f_M	
$t_{Aufnahme}$	Aufnahmedauer	[s]
x	Zählvariable	
z	Schaufelzahl des Vergleichsventilators	
Δf	Frequenzauflösung	[Hz]
ε	Formfaktor des Bewertungsfensters	
φ	Liferzahl	

20 Anhang

20.1 Auflistung der verwendeten Geräte

1. Soundkarte der Firma TerraTec:
   Terra Tec DMX XFire 1024
   Dynamik: 96 dB

2. B & K-Kondensatormikrofon (B & K = Brüel & Kjær):
   Typ 4133

3. B & K-Kondensatormikrofon:
   Typ 4191
   Seriennummer: 1921618

   Mikrofonvorverstärker der Firma B& K:
   Type 2669
   Seriennummer: 2025233
   Stecker: 7-polig LEMO

4. Elektretmikrofon TCM 110
   AV-JEFE

5. Akustik-Kalibrator der Firma B & K:
   Sound Level Calibrator
   Typ 4231
   Kalibrierfrequenz: 1000 Hz ± 0,1 %
   Kalibrierpegel: 94 dB SPL oder 114 dB SPL
   Kalibriergenauigkeit: ± 0,20 dB

6. Pistonphon der Firma B & K:
   Typ 4228
   Seriennummer: 1561149
   Nenn-Kalibrierfrequenz: 250 Hz
   Eigentliche Kalibrierfrequenz: $10^{2,4}$ Hz oder 251,2 Hz ± 0,1 %
   Kalibrierpegel: 124 dB SPL
   Kalibriergenauigkeit: ± 0,2 dB

7. Nexus-Vorverstärker der Firma B & K:
   B & K Conditioning Amplifier (Signalkonditionierer)
   Typ 2690 A0S4
   Seriennummer: 2051866
   Mikrofonanschluss: 7-polig LEMO

8. 24 V-Netzteil für den Nexus:
   B & K ZG 0400
   Astec Model SA45-3109
   Input: AC 100-240 V; 50/60 Hz; max. 1,5 A
   Output: DC 24 V; max. 45 W
   Geräte-Nr.: 2178019943 R2 9849C2

9. HP-Analysator:
   HP 35665A Dynamic Signal Analysator
   (Dynamischer Zweikanal-Singalanalysator)
   LR50254C
   Seriennummer: 3137A01722
   Dynamik: 72 dB

10. B & K Analysator:
    Dual Channel Real-time Frequency Analyzer
    (Zweikanal-Echtzeit-Frequenzanalysator)
    Typ 2133
    Seriennummer: 1437020
    Dynamik: 80 dB

11. TLC-Steuerung (Twin Line Controller):
    Typ: TLC 511 F
    Seriennummer: 1110066159
    Software-Prg.-Nr.: 767.00 REV. 1.013
    Hardware RS: 09
    Ident.-Nr.: 63451100004
    M4: RS485-C

12. 24 V-Netzteil für die TLC-Steuerung:
    Voltkraft
    Regulated DC Power Supply 24 V
    Input: AC 230 V; 50 Hz; 225 W
    Output: DC 24 V; 3 bis max. 5 A
    Geräte-Nr.: P22/CI 3593-02

20.2 Befestigung des Mikrofons

Zur reproduzierbaren Befestigung des Mikrofons in der Mikrofonhalterung wurde der Vorverstärker nur bis zu seiner Kerbe ((1) Abbildung 20.1) in das Halterungsrohr (2) hineingeschoben und dann mit Hilfe von Isolierband an diesem Rohr fixiert.

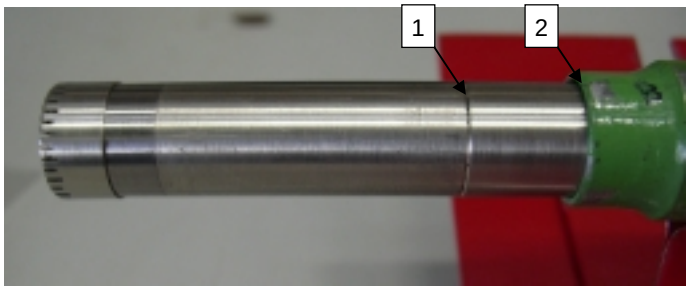


Abbildung 20.1: Kerbe (1) am Mikrofonvorverstärker, die mit der Rohrkante (2) zur Deckung gebracht wurde.

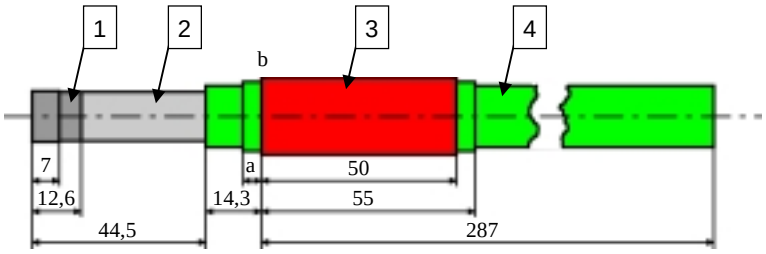


Abbildung 20.2: Skizze der Mikrofonlage wie sie in Abbildung 20.1 abgebildet ist. Die Kante b ist bündig mit der Kante der Zugangsöffnung im Rohr des Drehkanals (vgl. Abbildung 14.4 (4)); mit a = 4,5 mm; 1: Mikrofonkapsel, 2: Mikrofonvorverstärker, 3: Mikrofonhalterung der Mikrofonklappe, 4: Adapterrohr.

20.3 Antriebskomponenten

20.3.1 Riemendaten

Hersteller	Breco
Riemenart	BRECOFLEX-Zahnriemen
Profil	Hochleistungsprofil AT 10
Teilung	10 mm
Riemenlänge	3000 mm
Riemenbreite	25 mm
Zahnhöhe	2,5 mm
Rückenstärke	2 mm
zulässige Zugkraft	3500 N
zulässige Dehnung	4 mm/m
spezifische Riemenmasse	0,138 kg/m

Tabelle 20.1: Riemendaten [2].

20.3.2 Schrittmotor

Hersteller	SIG positec Berger Lahr
Typ	3-Phasen-Schrittmotor VRDM 397/50 LWC
Motornummer	52425035200
Motorspannung	325 V
Nenndrehmoment	2 Nm
Nennstrom	1,75 A
Masse	2,5 kg
Gehäuselänge	110 mm
Zentrierbunddurchmesser	60 mm
Wellendurchmesser	12 mm

Tabelle 20.2: Auswahl der Schrittmotordaten .

20.3.3 Getriebe

Hersteller	Alpha Getriebebau
Typ	LP 090
Getriebeart	Planetengetriebe
Stufen	2
Gesamtübersetzung	25
max. Radialkraft am Abtrieb	2400 N
max. Antriebsdrehzahl	6000 min^{-1}
Nenndrehmoment am Abtrieb	40 Nm
Masse	5,1 kg
Einbaulage	beliebig
Laufgeräusch bei n_1 = 3000 min^{-1}	kleiner gleich 72 dB(A)
Zahneingriffsfrequenz f_z	Erste Stufe: $f_{z1} = n_1 \cdot 0{,}36$ [Hz] Abtriebsstufe: $f_{z2} = n_1 \cdot 0{,}072$ [Hz] Laut Hersteller ist die zweite Harmonische ($2f_z$) dominanter.

Tabelle 20.3: Getriebedaten [1], mit der Antriebsdrehzahl n_1 [min^{-1}].

20.3.4 Zahnscheiben

Riementeilung	10 mm
Ritzel	
Werkstoff	Aluminium
Zähnezahl	21
Wirkkreisdurchmesser	66,8 mm
Ritzelbreite	35 mm
Ritzelbohrung	22 mm
Passfedernutbreite	6 mm
Zahnscheibe	
Werkstoff	Aluminium
Zähnezahl	168
Wirkkreisdurchmesser	534,8 mm
Scheibenbreite	40 mm
Laufflächenbreite	25 mm
Absatzdurchmesser	468 mm
Scheibeninnendurchmesser	398 mm
Teilkreisdurchmesser	446 mm
Teilkreisbohrungsdurchmesser	12,2 mm

Tabelle 20.4: Ritzel- und Zahnscheibendaten.

20.3.5 Spannrollen

Werkstoff	Aluminium
Außendurchmesser	71 mm
Rollenbreite	40 mm
Laufflächendurchmesser	60 mm
Laufflächenbreite	27 mm
Exzentrizität des Gewindes	5 mm
Gewinde	M 12
Schlüsselweite des Exzenters	27 mm

Tabelle 20.5: Spannrollendaten.

20.4 Koppeltafel

Tabelle 6 : Koppeltafel

		M \ $\bar{M}$	a	b	c	d	e
	1	M	$l M\bar{M}$	$\frac{1}{2} l M\bar{M}$	$\frac{1}{2} l M\bar{M}$	$\frac{1}{2} l M(\bar{M}_1+\bar{M}_2)$	$\frac{1}{2} l M\bar{M}$
	2	M	$\frac{1}{2} l M\bar{M}$	$\frac{1}{3} l M\bar{M}$	$\frac{1}{6} l M\bar{M}$	$\frac{1}{6} l M(\bar{M}_1+2\bar{M}_2)$	$\frac{1}{6} l M\bar{M}(1+\alpha)$
	3	M_1 M_2	$\frac{1}{2} l(M_1+M_2)\bar{M}$	$\frac{1}{6} l(M_1+2M_2)\bar{M}$	$\frac{1}{6} l(2M_1+M_2)\bar{M}$	$\frac{1}{6} l[M_1(2\bar{M}_1+\bar{M}_2)+ M_2(\bar{M}_1+2\bar{M}_2)]$	$\frac{1}{6} l[M_1(1+\beta)+M_2(1+\alpha)]\bar{M}$
	4	M_1 M_2	$\frac{1}{2} l(M_1-M_2)\bar{M}$	$\frac{1}{6} l(M_1-2M_2)\bar{M}$	$\frac{1}{6} l(2M_1-M_2)\bar{M}$	$\frac{1}{6} l\cdot[M_1(2\bar{M}_1+\bar{M}_2)- -M_2(\bar{M}_1+2\bar{M}_2)]$	$\frac{1}{6} l[M_1(1+\beta)-M_2(1+\alpha)]\bar{M}$
	5	M, c, d	$\frac{1}{2} l M\bar{M}$ $\gamma+\delta=1$	$\frac{1}{6} l M\bar{M}(1+\gamma)$ $\gamma=\frac{c}{l}$	$\frac{1}{6} l M\bar{M}(1+\delta)$ $\delta=\frac{d}{l}$	$\frac{1}{6} l M[\bar{M}_1(1+\delta)+ +\bar{M}_2(1+\gamma)]$	$\frac{1}{6} l M\bar{M}\left[2-\frac{(\alpha-\gamma)^2}{\alpha\delta}\right]$ für $\alpha \geq \gamma$ $\frac{1}{6} l\cdot M\bar{M}\left[2-\frac{(\alpha-\gamma)^2}{\beta\gamma}\right]$ für $\alpha \leq \gamma$
quadratische Parabel	6	S M	$\frac{2}{3} l M\bar{M}$	$\frac{1}{3} l M\bar{M}$	$\frac{1}{3} l M\bar{M}$	$\frac{1}{3} l M(\bar{M}_1+\bar{M}_2)$	$\frac{1}{3} l M\bar{M}(1+\alpha\beta)$
	7	S M	$\frac{2}{3} l M\bar{M}$	$\frac{5}{12} l M\bar{M}$	$\frac{1}{4} l M\bar{M}$	$\frac{1}{12} l M(3\bar{M}_1+5\bar{M}_2)$	$\frac{1}{12} l M\bar{M}(5-\beta-\beta^2)$
	8	S M	$\frac{1}{3} l M\bar{M}$	$\frac{1}{4} l M\bar{M}$	$\frac{1}{12} l M\bar{M}$	$\frac{1}{12} l M(\bar{M}_1+3\bar{M}_2)$	$\frac{1}{12} l M\bar{M}(1+\alpha+\alpha^2)$
kubische	9	S M	$\frac{1}{4} l M\bar{M}$	$\frac{1}{5} l M\bar{M}$	$\frac{1}{20} l M\bar{M}$	$\frac{1}{20} l M(\bar{M}_1+4\bar{M}_2)$	$\frac{1}{20} l M\bar{M}(1+\alpha)(1+\alpha^2)$

S = Scheitel- bzw. Sattelpunkt

Abbildung 20.3: Koppeltafel [5].

20.5 Formulierung der Verschiebungen δ_i

Gleichungssystem:

$$\text{I)} \quad \delta_{10} + X_1\delta_{11} + X_2\delta_{12} + X_3\delta_{13} = 0$$

$$\text{II)} \quad \delta_{20} + X_1\delta_{21} + X_2\delta_{22} + X_3\delta_{23} = 0$$

$$\text{III)} \quad \delta_{30} + X_1\delta_{31} + X_2\delta_{32} + X_3\delta_{33} = 0$$

Gleichung I):

$$\delta_{10} = \frac{1}{6}\cdot l_2\cdot\left(M_{11}\cdot\left(2\cdot M_{01}+M_{02}\right)+M_{12}\cdot\left(M_{01}+2\cdot M_{02}\right)\right)+\frac{1}{6}\cdot l_3\cdot\left(2\cdot M_{12}+M_{13}\right)\cdot M_{02}$$

$$\delta_{11} = \frac{1}{3}\cdot l_1\cdot M_{11}^2$$

$$\delta_{12} = \frac{1}{2}\cdot l_1\cdot M_{11}\cdot M_{21}$$

$$\delta_{13} = 0$$

Gleichung II):

$$\delta_{20} = \frac{1}{2} \cdot l_2 \cdot M_{21} \cdot (M_{01} + M_{02}) + \frac{1}{2} \cdot l_3 \cdot M_{21} \cdot M_{02}$$

$$\delta_{21} = \frac{1}{2} \cdot l_1 \cdot M_{21} \cdot M_{11}$$

$$\delta_{22} = l_1 \cdot M_{21}^2$$

$$\delta_{23} = 0$$

Gleichung III):

$$\delta_{30} = l_2 \cdot M_{31T} \cdot M_{01T} + l_3 \cdot M_{31T} \cdot M_{02T}$$

$$\delta_{31} = 0$$

$$\delta_{32} = 0$$

$$\delta_{33} = l_1 \cdot M_{31T}^2$$

20.6 Knickzahlentabelle

Werkstoffe	AlMg4,5Mn G31 [1]) und AlMgSi1 F28					AlMg2Mn0,8 G24, F24, F25, AlMg3, AlMgSi0,5 F22				
Basiswert für Streckgrenze in N/mm²	200					160				
Schlankheitsgrad λ	0	2	4	6	8	0	2	4	6	8
20	1	1	1,02	1,04	1,06	1	1	1,02	1,04	1,05
30	1,08	1,10	1,13	1,15	1,18	1,08	1,10	1,13	1,15	1,18
40	1,21	1,24	1,28	1,31	1,34	1,20	1,23	1,25	1,27	1,30
50	1,38	1,42	1,47	1,52	1,57	1,33	1,37	1,41	1,45	1,49
60	1,63	1,71	1,82	1,94	2,06	1,53	1,58	1,62	1,66	1,71
70	2,18	2,30	2,43	2,57	2,70	1,76	1,82	1,87	1,96	2,06
80	2,84	2,99	3,14	3,29	3,44	2,17	2,28	2,39	2,50	2,62
90	3,60	3,76	3,93	4,10	4,27	2,74	2,87	2,99	3,12	3,25
100	4,44	4,62	4,81	4,99	5,18	3,39	3,52	3,66	3,80	3,95
110	5,38	5,57	5,78	5,98	6,19	4,10	4,25	4,40	4,56	4,71
120	6,40	6,61	6,83	7,06	7,28	4,88	5,04	5,21	5,38	5,55
130	7,51	7,74	7,98	8,22	8,46	5,72	5,90	6,08	6,26	6,45
140	8,71	8,96	9,22	9,47	9,73	6,64	6,83	7,02	7,22	7,42
150	10,00	10,27	10,54	10,81	11,09	7,62	7,82	8,03	8,24	8,45
160	11,38	11,66	11,95	12,25	12,54	8,67	8,89	9,11	9,33	9,56
170	12,84	13,15	13,45	13,77	14,08	9,79	10,02	10,25	10,49	10,73
180	14,44	14,72	15,05	15,37	15,71	10,97	11,22	11,46	11,71	11,97
190	16,04	16,38	16,73	17,07	17,42	12,22	12,48	12,74	13,01	13,27
200	17,78	18,13	18,49	18,86	19,23	13,54	13,82	14,09	14,37	14,65
210	19,60	19,97	20,35	20,73	21,12	14,93	15,22	15,51	15,80	16,09
220	21,51	21,90	22,30	22,70	23,10	16,39	16,69	16,99	17,29	17,60
230	23,51	23,92	24,33	24,75	25,17	17,91	18,22	18,54	18,86	19,18
240	25,60	26,03	26,46	26,89	27,33	19,50	19,83	20,16	20,49	20,82
250	27,77					21,16				

[1]) Für aus Blechen zusammengesetzte Querschnitte von Druckgliedern

Abbildung 20.4: Knickzahlentabelle [10].

20.7 Verbindungslemente

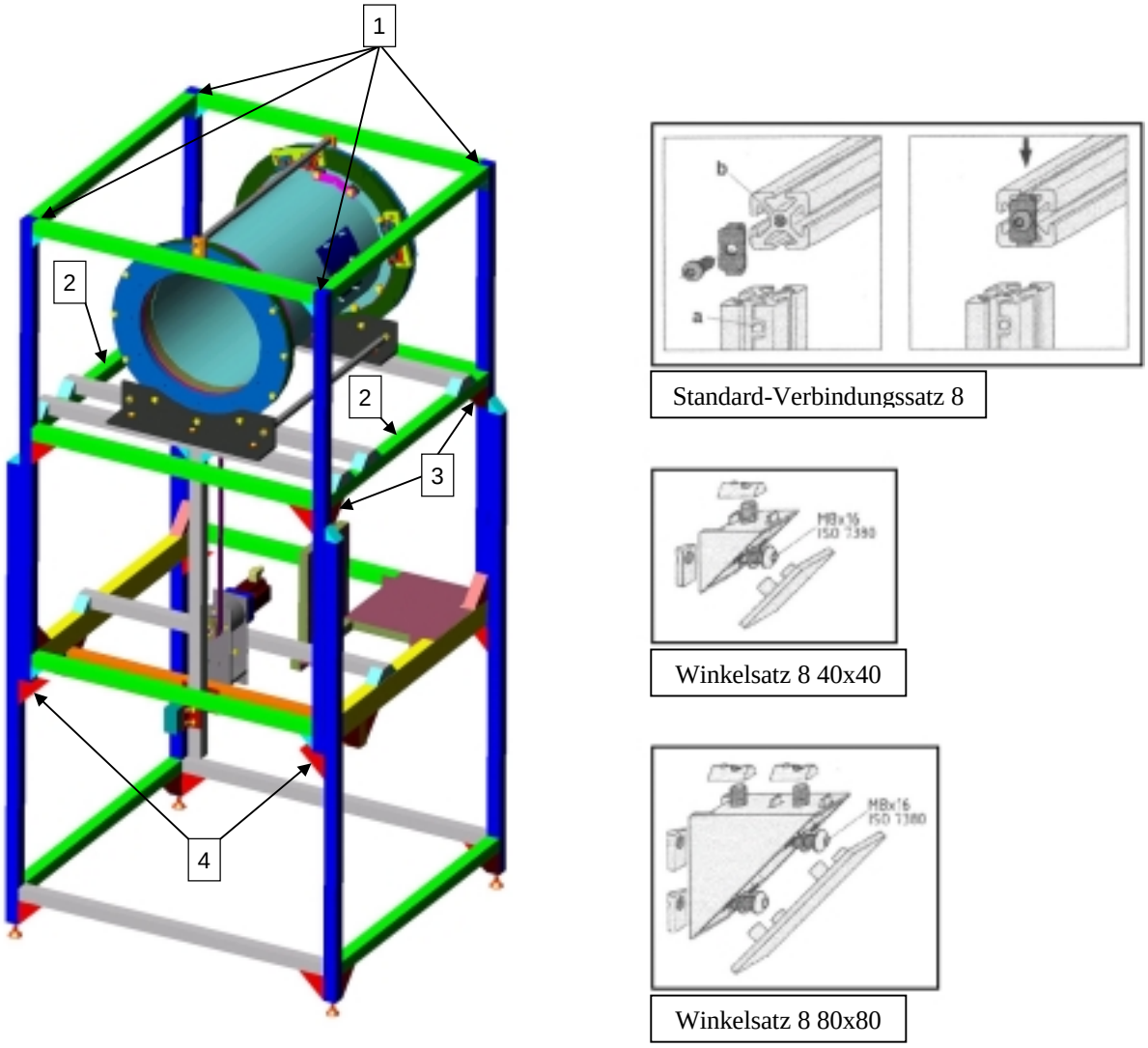


Abbildung 20.5: Erläuterung der Profilverbindungen am Drehkanalgestell, Bilder rechts [21]

Die Profile werden generell über die Winkelsätze zusammengehalten. Die vier Winkel (3), auf denen die Längsträger (2) ruhen, und die vier Winkel (4), auf denen der innere Gestellteil ruht, sind über Nutsteine der schweren Baureihe mit den Gestellbeinen verbunden. Diese Nutsteine lassen sich nicht wie die Standardausführung seitlich in die Profilnuten einlegen, sondern müssen von der Stirnseite der Profile in die Nut hineingeschoben werden. Dafür weisen sie aber eine größere Auflagefläche auf.

Die Profile an den Eckpunkten (1) wurden zusätzlich zu den Winkelsätzen noch über Verbindungssätze verbunden.

20.8 Werkstoffdaten der item-Profile

Strangpressprofil
Kurzzeichen Al Mg Si 0,5 F 25
Werkstoffnummer 3.3206.72
Zustand: warmausgehärtet

Mechanische Werte
(gelten nur in Pressrichtung)

Zugfestigkeit Rm:	min. 245 N/mm²
0,2-Grenze Rp 0,2	min. 195 N/mm²
Dichte	2,7 kg/dm³
Bruchdehnung A_5	min.10 %
Bruchdehnung A_{10}	min. 8 %
Linearer Aus-dehnungskoeffizient:	$23{,}6 \times 10^{6}$ 1/K
Elastizitätsmodul E	ca. 70.000 N/mm²
Schubmodul G	ca. 25.000 N/mm²
Härte	ca. 75 HB - 2,5/187,5

Abbildung 20.6: Werkstoffdaten der item-Profile [21].

20.9 Kabelbelegung für den Schnittstellenumsetzer MP923

Kabelbelegungen für die Kommunikation zwischen RS485 und RS232 über den Umsetzer MP923

Nach Angaben des Einkaufkataloges von SIG Positec Automation (Faxzusendung)

Schnittstellenkabel RS485 LS
(Vom MP923 zum TLC)

Stecker D-Sub 9	Buchse D-Sub 9	Signal
1	1	+12V
2	2	GND
3	3	-TxD
8	8	TxD
4	4	-RxD
9	9	RxD
5	5	RGND
Gehäuse	Gehäuse	Schirm
	1-6	Brücke
	2-7	Brücke

Schnittstellenkabel RS232
(Vom MP923 zum PC)

Stecker D-Sub 25	Buchse D-Sub 9	Signal
2	3	
3	2	
7	5	
Gehäuse	Gehäuse	Schirm
	4-6	Brücke
	7-8	Brücke

Abbildung 20.7: Kabelbelegungstabellen [33].

20.10 Kalibriersignal

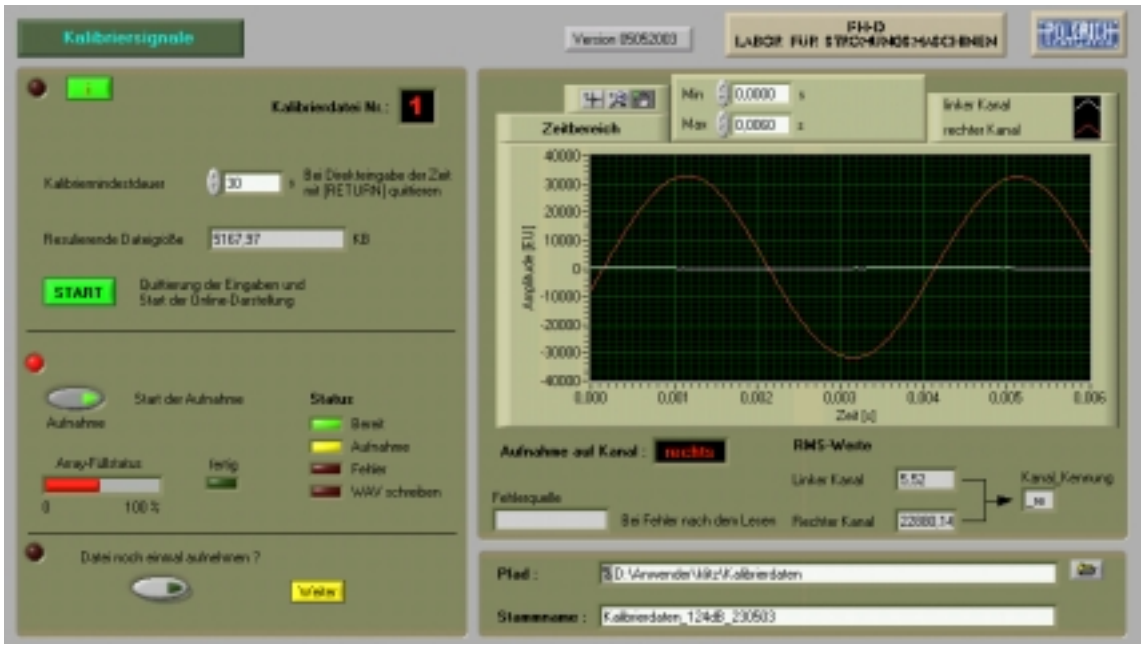


Abbildung 20.8: Gut ausgesteuertes Kalibriersignal (250 Hz, 124 dB).

Abbildung 20.8 zeigt die Darstellung des Kalibriersignals von 250 Hz in dem Standardanzeigebereich von 0 s bis 0,06 s, bei guter Aussteuerung (ohne „Clipping“). Abbildung 20.9 zeigt das gleiche Signal bei einer Übersteuerung des Line-In-Eingangs. Das Signal ist gekappt, es liegt „Clipping“ vor.

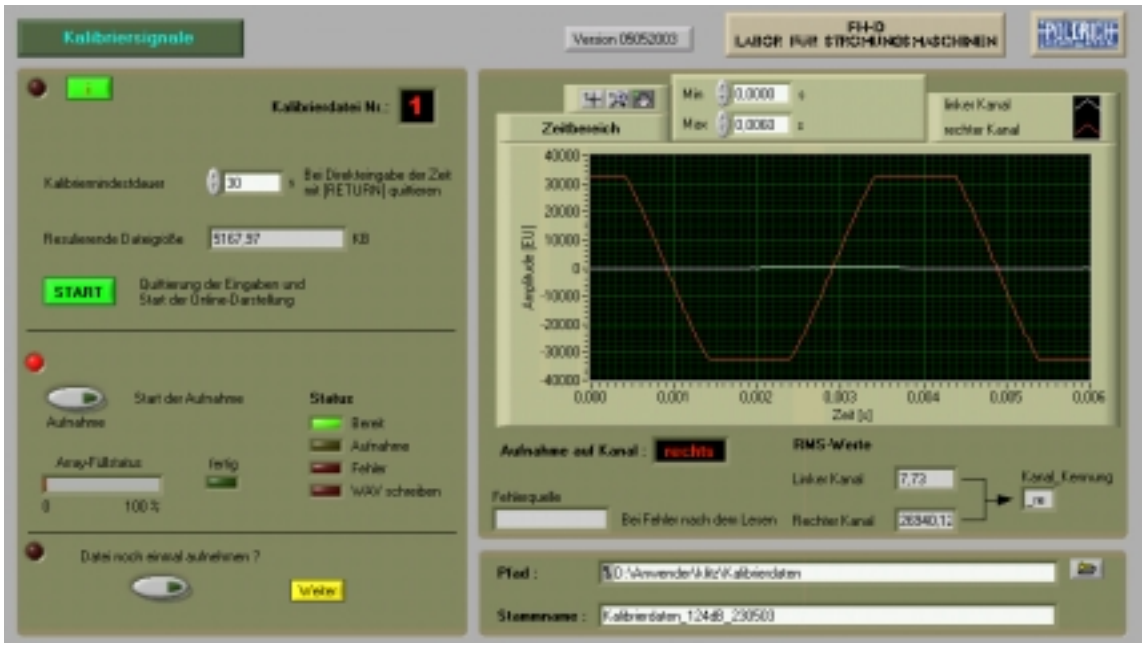
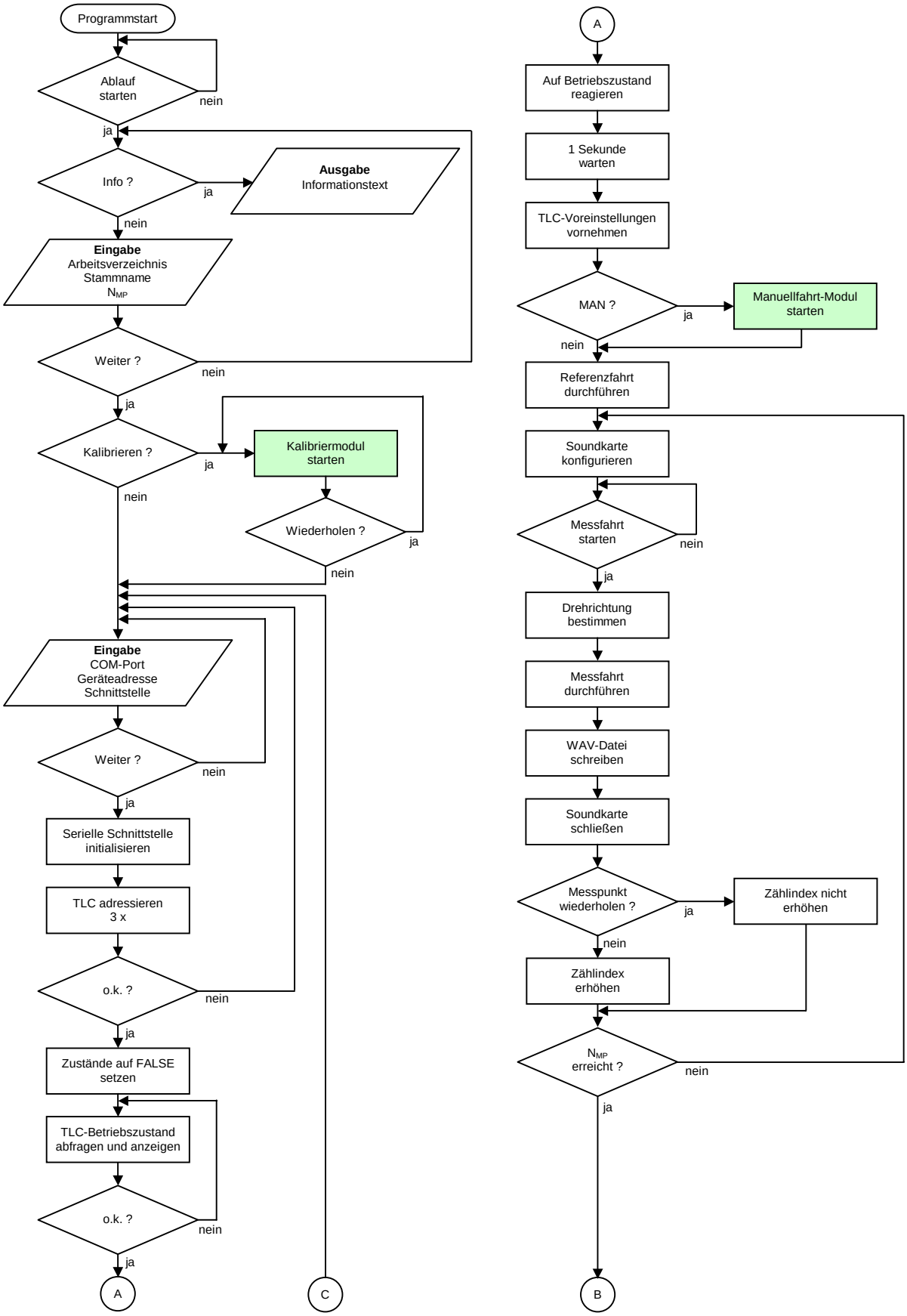


Abbildung 20.9: Schlechte Aussteuerung: Der Line-In-Eingang ist übersteuert (Kalibriersignal: 250 Hz).

20.11 Flussdiagramme



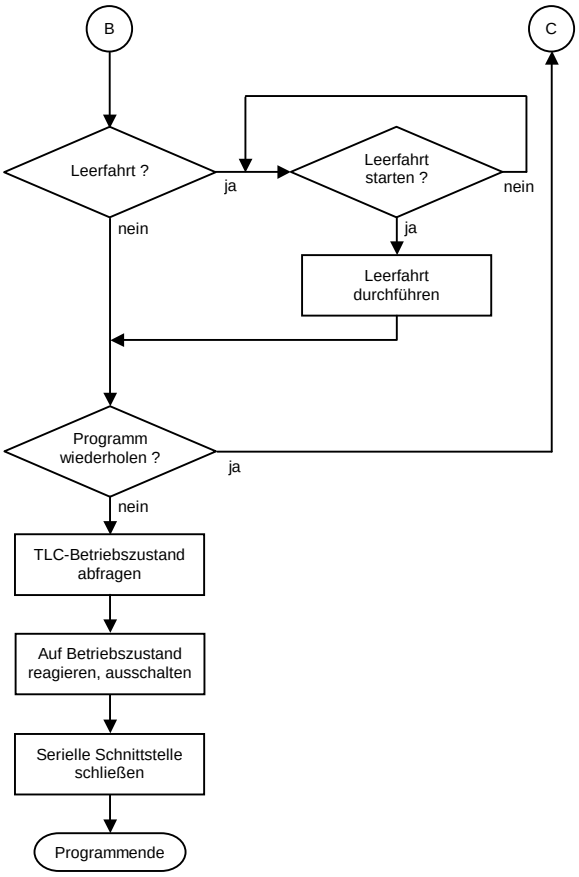


Abbildung 20.10: Flussdiagramm des Programms DK_Messfahrt_Aufnahme_XXXXXX.vi

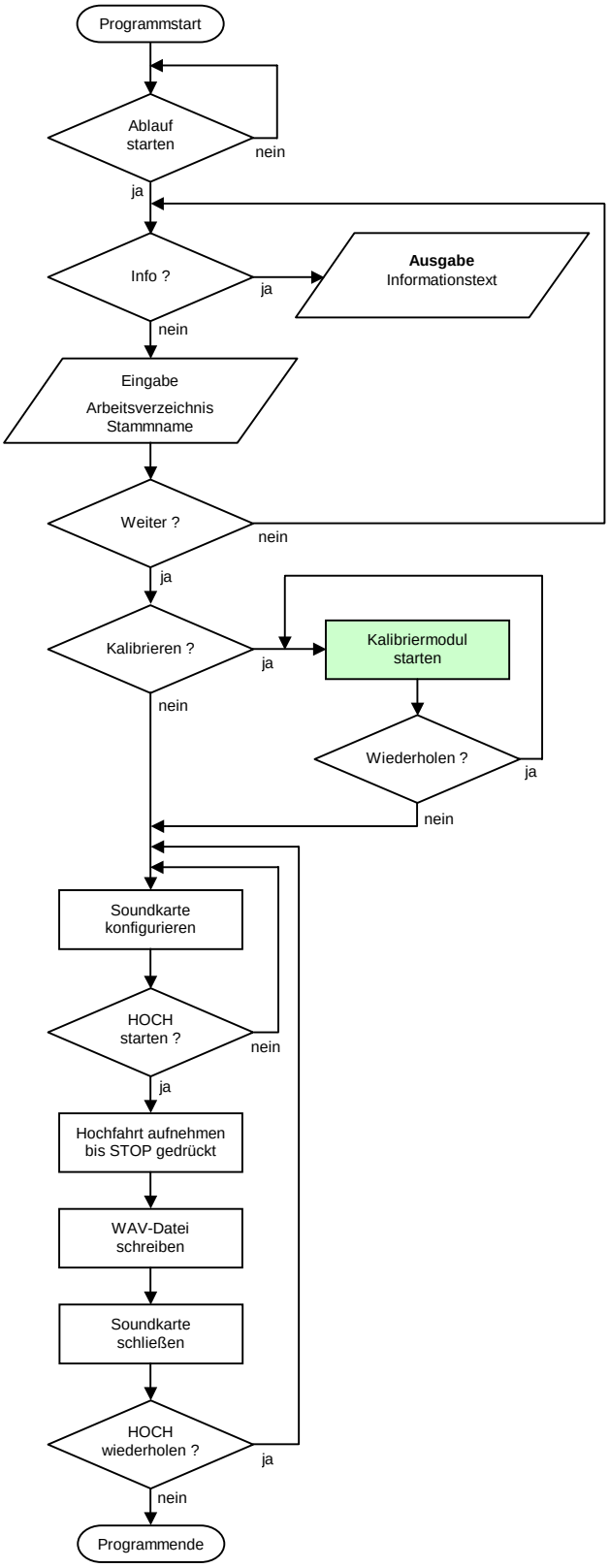


Abbildung 20.11: Flussdiagramm des Programms DK_Stillstand_Aufnahme_XXXXXX.vi.

20.12 Programm-Sequenzstruktur

H-Seq.	Inhalt DK_Stillstand_Aufnahme_XXXXXX.vi
0	**Einschalten** In einer While-Schleife wird der Einschaltknopf abgefragt, über den der Programmablauf gestartet wird. Vorgabe von Eingangszuständen der Schalter, Lampen und Variablen Anlageneinstellung:
1	**Messangaben** Eingabe: (While-Schleife) des Arbeitsverzeichnisses, des Stammnamen, der Anzahl der zu messenen Messpunkte Information zu den Dateinamen möglich über i-Taste abrufbar
2	**Aufnahme der Kalibrierdateien für die Mikrofonkalibrierung** Optional kann die Aufnahme von Kalibriersignalen gewählt werden (While-Schleife) (Case-Anweisung) True (Die Aufnahme von Kalibriersignalen soll durchgeführt werden) **0** Starten des Moduls zur Aufnahme der Kalibriersignale. Der Ablauf wird in einem separaten Fenster gesteuert. **1** Optionale Wiederholung der Aufnahme der Kalibriersignale (While-Schleife) False Keine Kalibriersignale aufnehmen Die Aufnahmeroutine kann bei Bedarf wiederholt werden.
3	**Aufnahme** **0** Hochfahrt aufnehmen (While-Schleife) **0** Soundkarte konfigurieren. **1** Warten auf den Startbefehl zur Aufnahme. **2** Hochfahrt aufnehmen. Bei Eingabe des Stopbefehls wird die Aufnahme gestoppt. **3** Schreiben der WAV-Datei. **4** Soundkarte schließen. **5** Abfrage, ob die Hochfahrt wiederholt werden soll (While-Schleife) **1** Messreihenende Programmende

Tabelle 20.6: Sequenzstruktur des Programms DK_Stillstand_Aufnahme_XXXXXX.vi.

20.13 Aufstellung der verwendeten Parameter

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die im Programm verwendeten Parameter.

Parametername	Index	Subindex	Bedeutung	Seite (TLC51x)
driveCrtl	28	1	Steuerwort für Zustandswechsel: *Endstufe einschalten, ausschalten, Quick-Stop auslösen, FaultReset*	12-4
driveStat	28	2	Statuswort für den Betriebszustand	12-17
acc	29	26	Beschleunigung [usr]	12-6
dec	29	27	Verzögerung [usr]	12-6
p_actusr	31	34	Ist-Position Motor in Anwendereinheiten [usr]	12-20
p_absPTP	35	1	Start einer Absolutpositionierung mit Übergabe des absoluten Zielpositionswertes [usr]	12-8
v_tarPTP	35	5	Soll-Geschwindigkeit der PTP-Positionierung [usr]	12-8
startHome	40	1	Start der Betriebsart Referenzierung	12-10
v_Home	40	4	Geschwindigkeit für die Suche des Referenzschalters [usr]	12-10
v_outHome	40	5	Geschwindigkeit für die Bearbeitung des Ausfahrweges sowie des Sicherheitsabstandes [usr]	12-10
p_disHome	40	7	Sicherheitsabstand von der Schaltkante zum Referenzpunkt [usr]	12-10
startMan	41	1	Start einer Manuellfahrt mit Übergabe der Steuerbits: *schnell, langsam, rechts, links*	12-7
n_slowMan	41	4	Geschwindigkeit für langsame Manuellfahrt [usr]	12-7
n_fastMan	41	5	Geschwindigkeit für schnelle Manuellfahrt [usr]	12-7

Tabelle 20.7: Übersicht der im Mess- und Steuerprogramm verwendeten Parameter zur Steuerung des Schrittmotors. Die Beschreibungen wurden aus [36] übernommen. Zur leichteren Recherche wurden zudem die Seitenzahlen zu [36] angegeben.

20.14 Entwickelte Sub-VIs

Im Folgenden werden diese Sub-VIs kurz erläutert. Es wird jeweils das Anschlussfeld des VIs dargestellt, gefolgt von einer tabellarischen Erläuterung der Anschlüsse. In den Tabellen zu ihren Anschlüssen werden Eingänge durch ein „E“ und Ausgänge durch ein „A“ gekennzeichnet. Tabelle 20.8 enthält eine Übersicht über die erstellten Sub-VIs.

Pos.	VI-Symbol	Dateiname
1		Achsposition_abfragen_XXXXXX_TGK.vi
2		Befehlsstring_an_TLC_senden_XXXXXX_TGK.vi
3		Befehlsstring_generieren_XXXXXX_TGK.vi
4		Binear_nach_Dezimal_XXXXXX_TGK.vi
5		Binearzahl_generieren_n_bit_XXXXXX_TGK.vi
6		Dezimal_nach_Binear_XXXXXX_TGK.vi
7		Drehkanal_Manuellfahrt_XXXXXX_TGK.vi
8		Hexadezimal_nach_Dezimal_oder_Binear_XXXXXX_TGK.vi
9		Kalibriersignal_aufnehmen_2_Mikrofone_XXXXXX_TGK.vi
10		RMS_Wert_aus_Zeitdaten_XXXXXX_TGK.vi
11		Segmentelement_TLC_auslesen_XXXXXX_TGK.vi
12		Seriell_Schreiben_XXXXXX_TGK.vi
13		Serielle_Schnittstelle_initialisieren_XXXXXX_TGK.vi

Tabelle 20.8: Alphabetische Auflistung der erstellten Sub-VIs.

Die nächsten beiden Abbildungen (Abbildung 20.12 und Abbildung 20.13) geben die Hierarchie der VIs in den beiden entwickelten LabVIEW-Programmen wieder.

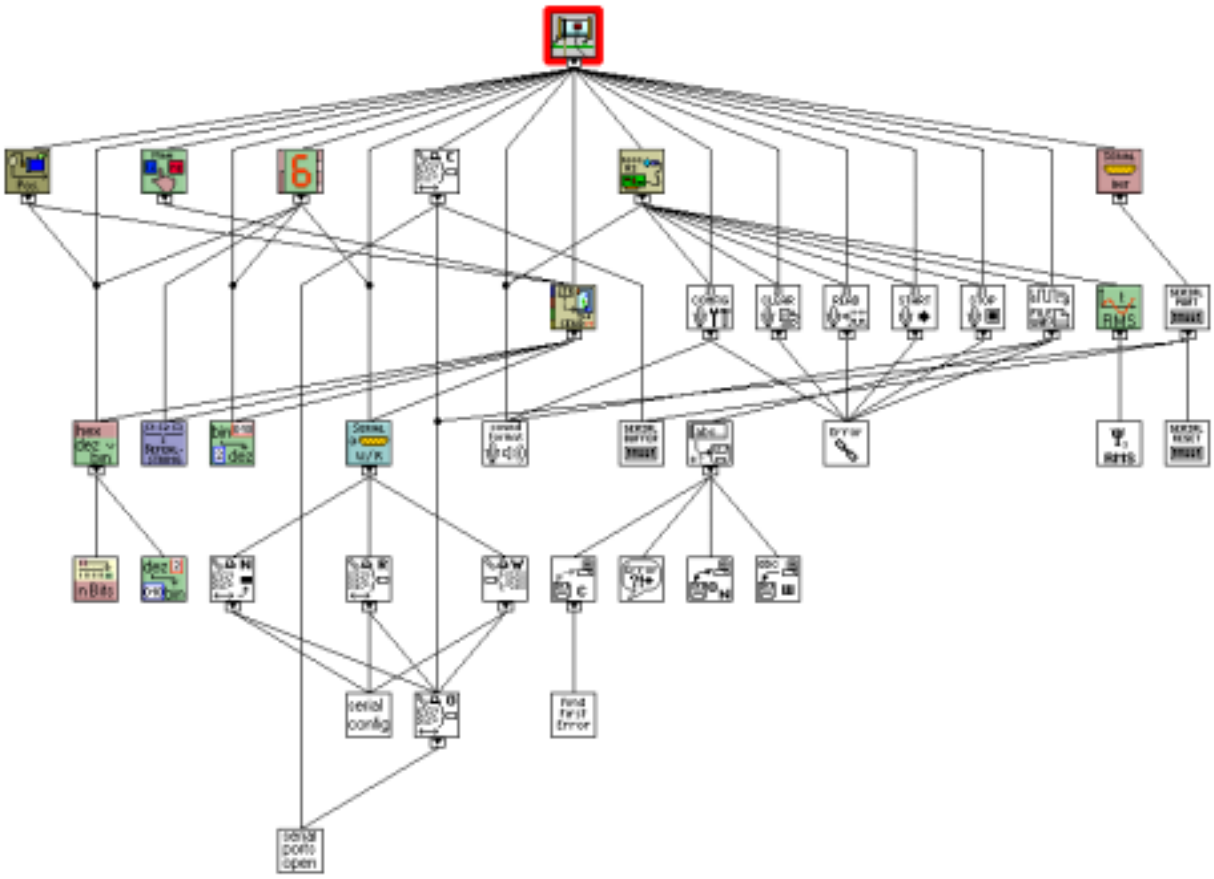


Abbildung 20.12: VI-Hierarchie des Mess- und Steuerungsprogramms DK_Messfahrt_Aufnahme_XXXXXX.vi.

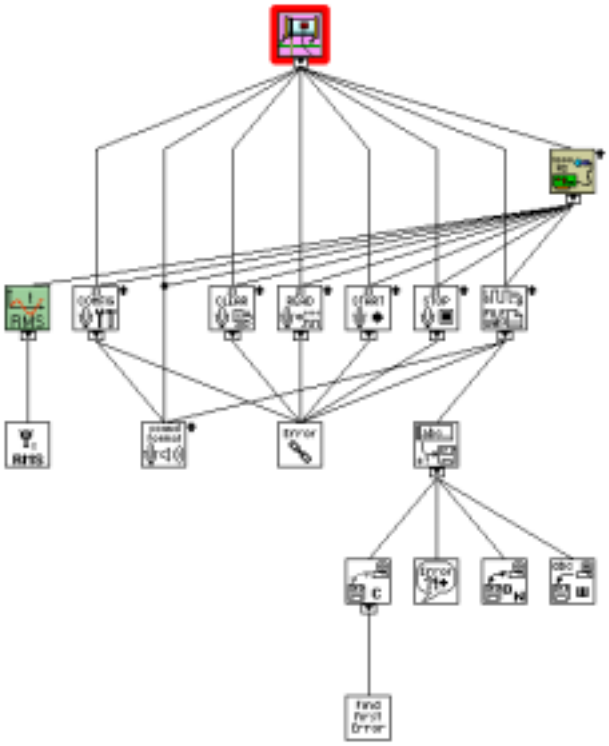


Abbildung 20.13: VI-Hierarchie des Programms DK_Stillstand_Aufnahme_XXXXXX.vi.

20.14.1 Achsposition_abfragen_XXXXXX_TGK.vi

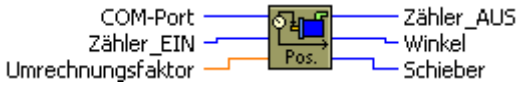


Abbildung 20.14: Anschlussfeld von Achsposition_abfragen_XXXXXX_TGK.vi.

I32	Zähler_EIN	Befehlszählereingang	E
I32	COM-Port	COM-Port an dem die Positioniersteuerung angeschlossen ist	E
DBL	Umrechnungsfaktor	Faktor, der die Übersetzung des Drehkanalantriebs berücksichtigt	E
U8	Schieber	Wert für einen grafischen Schieberegler, bezogen auf eine volle Umdrehung des Drehkanals	A
U32	Winkel	Aktuelle Achsposition als Winkel formuliert	A
I32	Zähler_AUS	Befehlszählerausgang	A

Tabelle 20.9: Anschlüsse von Achsposition_abfragen_XXXXXX_TGK.vi.

Das Sub-VI Achsposition_abfragen_XXXXXX_TGK.vi fragt mit Hilfe des Moduls Befehlsstring_an_TLC_senden_XXXXXX_TGK.vi die Istposition der Motorachse ab. Die Antwort wird intern über den Umrechnungsfaktor in einen Winkel umgerechnet, wobei sich die Umrechnung auf Winkel zwischen 0° und 360° von der absoluten Nullposition aus bezieht. Der Wert „Schieber“ gibt die vollzogene Umdrehung in Prozent wieder.

20.14.2 Befehlsstring_an_TLC_senden_XXXXXX_TGK.vi

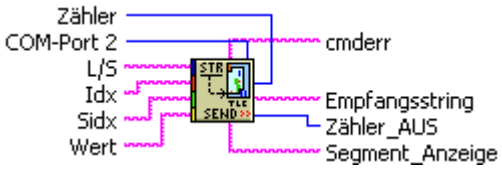


Abbildung 20.15: Anschlussfeld von Befehlsstring_an_TLC_senden_XXXXXX_TGK.vi.

abc	Wert	Zu übergebender Wert	E
I32	COM-Port 2	COM-Anschluss der Motorsteuerung	E
abc	Sidx	Subindex des Parameters	E
abc	Idx	Index des Parameters	E
abc	L/S	Byte 1 des Befehlsstrings (requestdata) („4“ oder „0“)	E
I32	Zähler	Befehlszählereingang	E
abc	Empfangsstring	Antwortstring	A
abc	cmderr	Information über einen Fehler (= „0“, wenn kein Fehler auftrat)	A
I32	Zähler_AUS	Befehlszählerausgang	A
abc	Segment_Anzeige	Inhalt der 7-Segmentanzeige	A

Tabelle 20.10: Anschlüsse von Befehlsstring_an_TLC_senden_XXXXXX_TGK.vi.

Dem Sub-VI Befehlsstring_an_TLC_senden_XXXXXX_TGK.vi werden die Parametereingaben zu einem Befehlsstring zusammengesetzt und an die Steuerunggesendet. Die

Parametereingaben müssen in Form von Strings vorliegen. Aus der empfangenen Antwort gehen der „Empfangsstring“, die Fehleranzeige „cmderr“ und der Inhalt der 7-Segmentanzeige hervor.

20.14.3 Befehlsstring_generieren_XXXXXX_TGK.vi

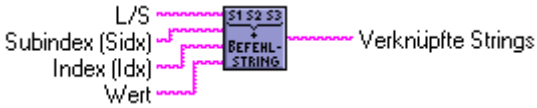


Abbildung 20.16: Anschlussfeld von Befehlsstring_generieren_XXXXXX_TGK.vi.

abc	L/S	Byte 1 des Befehlsstrings (requestdata) („4“ oder „0“)	E
abc	Wert	Zu übergebender Wert	E
abc	Index (Idx)	Index des Parameters	E
abc	Subindex (Sidx)	Subindex des Parameters	E
abc	Verknüpfte Strings	Zusammengestellter Befehlsstring	A

Tabelle 20.11: Anschlüsse von Befehlsstring_generieren_XXXXX_TGK.vi.

Das Sub-VI Befehlsstring_generieren_XXXXXX_TGK.vi ist im VI Befehlsstring_an-_TLC_senden_XXXXXX_TGK.vi enthalten und generiert aus den Eingangsstrings die Bytes 2 bis 17 des Befehlsstrings unter Berücksichtigung der festen Befehlslänge von 16 Zeichen und des Abschlusszeichens.

20.14.4 Binear_nach_Dezimal_XXXXXX_TGK.vi

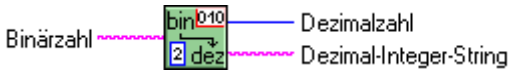


Abbildung 20.17: Anschlussfeld von Binear_nach_Dezimal_XXXXXX_TGK.vi.

abc	Binärzahl	Umzuwandelnder Binärzahlstring	E
I32	Dezimalzahl	Ergebnisdezimalzahl	A
abc	Dezimal-Integer-String	Ergebnisdezimalzahl als String	A

Tabelle 20.12: Anschlüsse von Binear_nach_Dezimal_XXXXXX_TGK.vi.

Das Sub-VI Binear_nach_Dezimal_XXXXXX_TGK.vi formt einen eingehenden Binärzahlstring in eine Dezimalzahl um, wobei die Dezimalzahl im Integer-Format und als String ausgegeben wird.

20.14.5 Binearzahl_generieren_n_bit_XXXXXX_TGK.vi

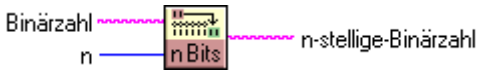


Abbildung 20.18: Anschlussfeld von Binearzahl_generieren_n_bit_XXXXXX_TGK.vi.

abc	Binärzahl	Eingehende Binärzahl als String	E
I32	n	Länge des Ergebnisstrings	E
abc	n-stellige-Binärzahl	Angepasste Binärzahl als n-stelliger String (Ergebnisstring)	A

Tabelle 20.13: Anschlüsse von Binearzahl_generieren_n_bit_XXXXXX_TGK.vi.

Das Sub-VI Binearzahl_generieren_n_bit_XXXXXX_TGK.vi erweitert einen eingehenden Binärzahlstring auf die vorgegebene Länge n, indem sie bei Bedarf von links mit Nullen aufgefüllt wird. Der Wert n muss als die Länge des Binärzahlstrings sein.

20.14.6 Dezimal_nach_Binear_XXXXXX_TGK.vi

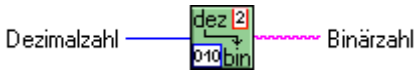


Abbildung 20.19: Anschlussfeld von Dezimal_nach_Binear_XXXXXX_TGK.vi.

U32	Dezimalzahl	Eingehende Dezimalzahl	E
abc	Binärzahl	Umgewandelte Dezimalzahl als String	A

Tabelle 20.14: Anschlüsse von Dezimal_nach_Binear_XXXXXX_TGK.vi.

Das Sub-VI Dezimal_nach_Binear_XXXXXX_TGK.vi formt eine eingehende Dezimalzahl in einen Binärzahlstring um.

20.14.7 Drehkanal_Manuellfahrt_XXXXXX_TGK.vi

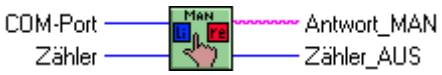


Abbildung 20.20: Anschlussfeld von Drehkanal_Manuellfahrt_XXXXXX_TGK.vi

I32	COM-Port	COM-Anschluss der Motorsteuerung	E
I32	Zähler	Befehlszählereingang	E
abc	Antwort_MAN	Empfangsstring	A
I32	Zähler_AUS	Befehlszählerausgang	A

Tabelle 20.15: Anschlüsse von Drehkanal_Manuellfahrt_XXXXXX_TGK.vi.

Mit dem Sub-VI Drehkanal_Manuellfahrt_XXXXXX_TGK.vi wird über eine eigene Bedienoberfläche die Manuellfahrt des Drehkanals gesteuert. Dieses VI setzt eine abgeschlossene Initialisierung und Adressierung der Positioniersteuerung voraus.

20.14.8 Hexadezimal_nach_Dezimal_oder_Binear_XXXXXX_TGK.vi

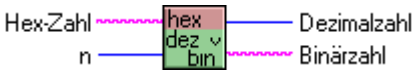


Abbildung 20.21: Anschlussfeld von Hexadezimal_nach_Dezimal_oder_Binear_XXXXXX_TGK.vi.

I32	n	Anzahl der Stellen der Binärzahl	E
abc	Hex-Zahl	Hexadezimalzahl als String	E
abc	Binärzahl	Binärzahl als String	A
U32	Dezimalzahl	Dezimalzahl	A

Tabelle 20.16: Anschlüsse von Hexadezimal_nach_Dezimal_oder_Binear_XXXXXX_TGK.vi.

Das Sub-VI Hexadezimal_nach_Dezimal_oder_Binear_XXXXXX_TGK.vi ermittelt aus einer Hexadezimalzahl die zugehörige Dezimalzahl und den Binärzahlstring. Die Hexadezimalzahl muss als String vorliegen. Über den Eingang n wird die Länge der Binärzahl vorgegeben (vgl. auch Abschnitt 20.14.5).

20.14.9 Kalibriersignal_aufnehmen_2_Mikrofone_XXXXXX_TGK.vi

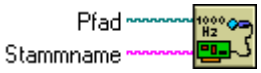


Abbildung 20.22: Anschlussfeld von Kalibriersignal_aufnehmen_2_Mikrofone_XXXXXX_TGK.vi.

	Pfad	Dateipfad für die Dateiablage	E
abc	Stammname	Eingang für den Stammnamen	E

Tabelle 20.17: Anschlüsse von Kalibriersignal_aufnehmen_2_Mikrofone_XXXXXX_TGK.vi.

Das VI Kalibriersignal_aufnehmen_2_Mikrofone_XXXXXX_TGK.vi dient der Aufnahme der Kalibriersignale auf beiden Kanälen eines Stereosystems. Es wird über eine eigene Bedienungsfläche gesteuert und ist auch unabhängig von dem Mess- und Steuerprogramm lauffähig.

20.14.10 RMS_Wert_aus_Zeitdaten_XXXXXX_TGK.vi

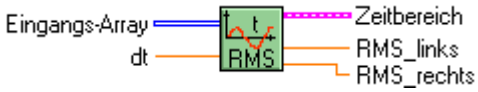


Abbildung 20.23: Anschlussfeld von RMS_Wert_aus_Zeitdaten_XXXXXX_TGK.vi.

I16	Eingangs-Array	Stereo-16-bit Feld aus dem SI-Modul	E
DBL	dt	Kehrwert der Abtastrate	E
	Zeitbereich	Informationen für eine Darstellung im Zeitbereich	A
DBL	RMS_links	Effektivwert des Signals am linken Kanal	A
DBL	RMS_rechts	Effektivwert des Signals am rechten Kanal	A

Tabelle 20.18: Anschlüsse von RMS_Wert_aus_Zeitdaten_XXXXXX_TGK.vi.

Das Sub-VI RMS_Wert_aus_Zeitdaten_XXXXXX_TGK.vi berechnet den Effektivwert des Zeitsignals für jeden der beiden Stereokanäle. Als Eingangs-Array wird ein Stereo-16-bit Feld erwartet. Neben den Effektivwerten werden über den Cluster „Zeitbereich“ Informationen für eine Darstellung des Zeitverlaufs ausgegeben.

20.14.11 Segmentelement_TLC_auslesen_XXXXXX_TGK.vi

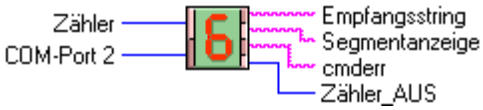


Abbildung 20.24: Anschlussfeld von Segmentelement_TLC_auslesen_XXXXXX_TGK.vi.

I32	COM-Port 2	COM-Port an dem die Positioniersteuerung angeschlossen ist	E
I32	Zähler	Befehlszählereingang	E
abc	Empfangsstring	Antwort der Positioniersteuerung	A
abc	cmderr	Fehleranzeige	A
abc	Segmentanzeige	Inhalt der 7-Segmentanzeige	A
I32	Zähler_AUS	Befehlszählerausgang	A

Tabelle 20.19: Anschlüsse von Segmentelement_TLC_auslesen_XXXXXX_TGK.vi

Das Sub-VI Segmentelement_TLC_auslesen_XXXXXX_TGK.vi entspricht im wesentlichen dem Sub-VI Befehlsstring_an_TLC_senden_XXXXXX_TGK.vi, nur dass hier intern ein fester Befehl zum Auslesen des Betriebszustandes vorgegeben ist.

20.14.12 Seriell_Schreiben_Lesen_XXXXXX_TGK.vi

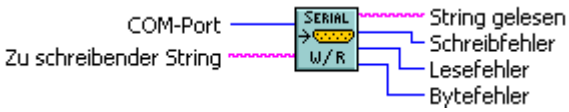


Abbildung 20.25: Anschlussfeld von Seriell_Schreiben_Lesen_XXXXXX_TGK.vi.

abc	Zu schreibender String	Das Kommando das an die Positioniersteuerung gesendet werden soll.	E
I32	COM-Port	COM-Port, an dem die Positioniersteuerung angeschlossen ist	E
I32	Schreibfehler	Fehler beim Schreiben, wenn ungleich „0“	A
I32	Lesefehler	Fehler beim Lesen, wenn ungleich „0“	A
I32	Bytefehler	Fehler bei der Ermittlung der Anzahl der anstehenden Bytes, wenn ungleich „0“	A
abc	String gelesen	Eingelesene Antwort der Positioniersteuerung	A

Tabelle 20.20: Anschlüsse von Seriell_Schreiben_Lesen_XXXXXX_TGK.vi

Das Sub-VI Seriell_Schreiben_Lesen_XXXXXX_TGK.vi sendet den Befehlsstring über den angegebenen COM-Port an die dort angeschlossene Positioniersteuerungung ließt nach 0,080 s die Antwort des Gerätes aus, die als Empfangsstring weitergegeben wird.

20.14.13 Serielle_Schnittstelle_initialisieren_XXXXXX_TGK.vi

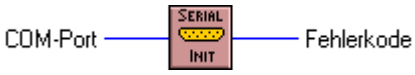


Abbildung 20.26: Anschlussfeld von Serielle_Schnittstelle_initialisieren_XXXXXX_TGK.vi.

I32	COM-Port	COM-Port an dem die Positioniersteuerung angeschlossen ist	E
I32	Fehlercode	Beträgt „–1“, wenn Baudrate, Datenbits, Stoppbits, Parität oder Anschlussnummer außerhalb des zulässigen Bereichs liegen oder der serielle Anschluss nicht initialisiert werden konnte.	A

Tabelle 20.21: Anschlüsse von Serielle_Schnittstelle_initialisieren_XXXXXX_TGK.vi.

Mit dem Sub-VI Serielle_Schnittstelle_initialisieren_XXXXXX_TGK.vi wird die Serielle Schnittstelle für die Kommunikation mit der Motorsteuerung vorbereitet. Die zu übergebenen Werte sind als Konstanten in dem VI eingebaut.

20.15 MATLAB-Quelltexte

In den folgenden Quelltexten symbolisiert das Zeichen „↵“ eine umgebrochene Zeile. Dieser Zeilenumbruch dient nur der Darstellung in dieser Arbeit, er ist im eigentlichen MATLAB-Programm nicht vorhanden.

20.15.1 Kalibrierfaktor_Kanal_bereich.m

```
%-----------------------------------------------------------------------
%- Kalibrierfaktor_Kanal_bereich.m
%- Programm zur Ermittlung des Kalibrierfaktors
%- 28.05.2003 Terence Klitz
%-----------------------------------------------------------------------
%- Dieses Programm berechnet den Kalibrierfaktor für beide Kanäle (re.
%- und li.). Nach Aufruf verlangt es die Kalibriersignale des rechten
%- Kanals, es sucht automatisch nach der Datei des linken Kanals.
%- Daher ist es erforderlich, dass beide Dateien im selben Ordner
%- existieren.
%- Das Ergebnis dieses Programmes ist jeweils der Kalibrierfaktor k [Pa/EU]
%- für den rechten und den linken Kanal. Es wird von einer Kalibrierung mit
%- 250 Hz (124 dB) oder 1000 Hz (94 dB) ausgegangen. Analysiert wird eine
%- WAV-Datei, die im Stereo-Format vorliegen muss und der festgelegen
%- Dateinamensvergabe entspricht, es wird dann der jeweilige Kanal erkannt:
%- [Stammname]_KALI_re.WAV oder [Stammname]_KALI_li.WAV.
%- Damit der Kalibrierfaktor in der richtigen Einheit ([Pa/EU])ausgegeben
%- werden kann, wird von einem Faktor = 1 ausgegangen und ein lineares APS
%- betrachtet.
%- Bei der Kalibrierung wird das Flattop-Fenster angewendet. Dazu ist
%- es erforderlich, dass die Flattop-Funktion [Haukap] im
%- Funktionsverzeichnis von MATALB existiert.
%- Die Kalibrierfaktoren für den rechten und linken Kanal werden
%- abschließend in einer Textdatei im Ordner der WAV-Dateien abgelegt:
%- [Stammname]_Kalibrierfaktor.TXT.
%- Der Kalibrierfaktor wird aus dem Gesamtpegel eines Bereiches, der die
%- Kalibrierfrequenz einschließt, berechnet. Dieser Bereich wird mit
%- f_bereich = 50 abgesteckt.
%-----------------------------------------------------------------------

clear all;
close all;
clc;

%-----------------------------------------------------------------------
%- Programmeinstellungen, die vom Benutzer vorgenommen werden müssen.
%- Standardeinstellung für ein Signal, das mit 44100 Hz abgetastet wurde:
%- Blockgröße von 32768 Werten
%- Divisor von 2.56
%- f_bereich von 50 Hz
%-----------------------------------------------------------------------

blockgroesse = 32768;     %- 16384; 32768; 65536; 131072
divisor      = 2.56;
f_bereich    = 50;        %- Frequenzbereich von der Kalibrierfrequenz
                          %- nach oben und unten, für die GP-Berechnung.

%-----------------------------------------------------------------------

%- Start mit dem rechten Kanal
```

```
kanal = 'rechts';
vergleich = 0;

%-------------------------------------------------------------------------
%- Programmschleife
%-------------------------------------------------------------------------

for i = 1:2  %- Es werden nur zwei Dateien analysiert.
 %- Dateiwahlschleife
 if i == 1 % Erster Durchlauf: rechten Kanal wählen

   while vergleich == 0

%-------------------------------------------------------------------------
%- Einlesen der Wav-Datei
%-------------------------------------------------------------------------

   fenstertitel             = strcat('WAV-Datei laden, Kanal: ', kanal);
   [dateiname, pfad]                = uigetfile('*.wav', fenstertitel);
   datei_string                     = strcat(pfad, dateiname);
   [zeitdaten_roh, abtastrate, bits] = wavread(datei_string);

   %- Namensergänzung für den rechten Kanal
   str_er = '_re';

   %- Länge der Kanal-Namenserweiterung
   l_str  = length(str_er);
   laenge_dateiname = length(dateiname);

   %- Position der Kanal-Namenserweiterung im Dateinamen ('_re' oder '_li')
   %- Dies geht, da hinter der Namensergänzung im Namen nichts mehr steht.
   pos_str = laenge_dateiname - 6;

   v_str = dateiname(pos_str:(pos_str+l_str-1));
   %- Entnahme eines Teilstrings aus dem Dateinamen, der Länge l_str.
   %- Dieser Teilstring wird mit den erwarteten Namenserweiterungen
   %- verglichen, wonach der gewählte Kanal ermittelt wird.
   %- Ergibt: '_re' oder '_li'.

   if strcmp(v_str, str_er)
       vergleich = 1;
   elseif strcmp(v_str, str_er)
       vergleich = 0;
       display('Falscher Kanal oder Dateinamenfehler');
   end %- if-Anweisung
   end %- while-Anweisung
   elseif i==2 %- zweiter Durchlauf: linken Kanal wählen
    datei_string  = strcat(pfad, dateiname(1:(laenge_dateiname - 6)),     ↵
    'li', '.wav')
    [zeitdaten_roh, abtastrate, bits] = wavread(datei_string);
 end

 %- Anzeige der analysierten Datei
 datei_string

%-------------------------------------------------------------------------
%- Textdatei für den Kalibrierfaktor vorbereiten
%- [Stammname]_Kalibrierfaktor.TXT.
%-------------------------------------------------------------------------

 if i==1
```

```
     textdatei = strcat(pfad, dateiname(1:(laenge_dateiname-
     12)),'_Kalibrierfaktor.txt');
     fid = fopen(textdatei,'w');
     fprintf(textdatei,' \n');
 end
%-----------------------------------------------------------------------

laenge_zeitdaten_roh = length(zeitdaten_roh);

%- Kanalwahl, rechts oder links
switch lower(kanal)
    case {'rechts'}
        zeitdaten_kanal = zeitdaten_roh(1:laenge_zeitdaten_roh,2);
    case {'links'}
        zeitdaten_kanal = zeitdaten_roh(1:laenge_zeitdaten_roh,1);
    otherwise
        display('Fehler');
        hold
end

window          = flattop(blockgroesse);
fenster_flattop = 4.688600988;
epsilon_flattop = 3.83;
ueberlappung    = 0;
p_null          = 2e-5;             %- [Pa]

%- Aus den Zeitdaten werden nun soviele Werte übernommen, wie
%- ganze Blöcke hineinpassen.
%- Es passen n_block mal ganze Blöcke in die Zeitdaten-Matrix.

laenge_zeitdaten_roh = length(zeitdaten_roh);
n_block              = (laenge_zeitdaten_roh - mod(laenge_zeitdaten_roh,
                        blockgroesse)) / blockgroesse;
wertezahl            = n_block * blockgroesse;
zeitdaten            = zeitdaten_kanal(1:wertezahl,1);
laenge_zeitdaten     = length(zeitdaten);
dauer                = laenge_zeitdaten / abtastrate;    %- [s]
dauer_block          = blockgroesse / abtastrate;        %- [s]
delta_f              = 1 / dauer_block;                  %- [Hz]
mittelungsanzahl     = n_block;

f_min    = 0;
% theoretische Maximalfrequenz
f_max_th = abtastrate / divisor;

% Maximalfrequenz, die mit delta_f abgedeckt werden kann.
f_max    = f_max_th - mod(f_max_th, delta_f);

% delta_f passt n-mal in f_max rein, es gibt aber n+1 Stützpunkte
n_f      = f_max / delta_f + 1;

frequenzen = (linspace(f_min, f_max, n_f))';


%-----------------------------------------------------------------------
%- Berechnung des linearen APS über die Funktion specgram
%-----------------------------------------------------------------------

[B_th, F_th, T] = specgram(zeitdaten, blockgroesse, abtastrate, window,
ueberlappung);

%- Übernahme des berücksichtigten Frequenzbereiches.
```

```
B = B_th(1:n_f,:);
F = F_th(1:n_f);

[m, n]    = size(B);

%-------------------------------------------------------------------------
%- Lineares APS
%-------------------------------------------------------------------------
%- Das APS kann aus der Multiplikation der FFT mit ihrer konjugiert
%- komplexen berechnet werden. Daraus geht dann das quadratische APS hervor
%- [V^2]. Das lineare APS erhält man, indem man aus dem quadratischen APS
%- die Wurzel zieht, oder das APS über die Betragsbestimmung der komplexen
%- Elemente in der FFT-Matrix B ermittelt.
%- Der zweite Weg wird hier angewendet.
%-------------------------------------------------------------------------

aps_lin = (2.0 * fenster_flattop * abs(B) / blockgroesse) / sqrt(2.0);

%- Der Faktor 2.0 ersetzt die theoretisch durchzuführende Addition
%- der Amplituden des negativen und positiven Frequenzbereiches,
%- was bei reellen Signalen zulässig ist.
%- Der Fensterfaktor (fenster_flattop) macht die Normierung des
%- angewendeten Wichtungsfensters rückgänig.
%- Mit der Division durch sqrt(2.) werden RMS-Amplituden berechnet.

%- Gesonderte Beachtung des Gleichanteils
%- Der Gleichanteil kommt nur einmal vor, darf also nicht mit
%- dem Faktor 2. vervielfacht werden.
aps_lin(1,1:n) = aps_lin(1,1:n) ./ 2.0;

%- Mitteln des APS (quadratisch)
aps_lin_mittel = sqrt(sum(aps_lin.^2, 2)/n);

%- Berechnung des Gesamtschalldruckpegels
GP_aps_lin_mittel = sqrt(1/epsilon_flattop * sum(aps_lin_mittel.^2));

%-------------------------------------------------------------------------
%- Berechnung des Kalibrierfaktors
%-------------------------------------------------------------------------
%- Ermittlung der Kalibrierfrequenz und des Kalibrierpegels
%-------------------------------------------------------------------------

%- Vorgabe, bei welchem Index der Kalibrierpegel zu finden ist
index_1000  = round(1000 / delta_f + 1); %- ungefährer Index des Pegels
index_250   = round(250 / delta_f + 1);  %- ungefährer Index des Pegels
delta_index = round(20 / delta_f);       %- Bereich um den Pegel

%- Maximum im vorgegebenen Frequenzbereich berechnen
max_1000 = max(aps_lin_mittel((index_1000 - delta_index):(index_1000 +    ↵
           delta_index)));
max_250  = max(aps_lin_mittel((index_250 - delta_index):(index_250 +      ↵
           delta_index)));

%- Das größere Maximum kennzeichnet den Kalibrierpegel
if max_1000 > max_250
    frequenz_kali = 1000
    pegel_kali    = 94
elseif max_1000 < max_250
    frequenz_kali = 250
    pegel_kali    = 124
else
```

```
    display('Fehler - Kalibrierfrequenz');
    hold;
end %- if-Anweisung

%- Frequenzbereich um die theoretische Kalibrierfrequenz festlegen
von_f_k = frequenz_kali - f_bereich;     %- [Hz]
bis_f_k = frequenz_kali + f_bereich;     %- [Hz]

%- Frequenzbereich in einen Stützstellenbereich umrechnen
von_index_k = (von_f_k - mod(von_f_k, delta_f)) / delta_f + 1;
bis_index_k = (bis_f_k - mod(bis_f_k, delta_f)) / delta_f + 1;

%- Berechnung des Kalibrierfaktors über den Gesamtpegel
GP_kali = sqrt(1/epsilon_flattop *                                    ↵
          sum(aps_lin_mittel(von_index_k:bis_index_k).^2));
kk_bereich        = 10^(pegel_kali / 20) * p_null ./ GP_kali;
m_k_bereich (i,1) = kk_bereich;
k_bereich         = num2str(kk_bereich,8);

aps(:,1)   = F;
aps(:,i+1) = aps_lin_mittel;     %- aps(:,2) rechter Kanal
                                 %- aps(:,3) linker Kanal

%-------------------------------------------------------------------------
%- Plotten des linearen APS
%-------------------------------------------------------------------------
figure(1);
set(gcf,'name', datei_string);

subplot(2,2,i);
plot(aps(:,1), aps(:,i+1));
    title(['Lineares APS von Kanal: ', kanal, '; Kalibrierfrequenz = ',    ↵
num2str(frequenz_kali) ' Hz; k = ', num2str(m_k_bereich(i,1)), '
[Pa/EU]']);
    xlabel('f [Hz]');
    ylabel(['Amplitude [EU]']);
    grid;

%-------------------------------------------------------------------------
%- Ablegen des Kalibrierfaktors in einer Datei
%-------------------------------------------------------------------------

fid = fopen(textdatei,'a');
fprintf(fid,'%11.8f\t%s \n', kk_bereich, kanal);
fclose(fid);
display(['Datei ', kanal, ' gespeichert']);

kanal = 'links';

maximum (i,1) = max(aps_lin_mittel);

%-------------------------------------------------------------------------
%- Anwendung der Kalibrierfaktoren auf das Kalibriersignal
%- Mit dieser Kontrolle kann geprüft werden, ob der Kalibrierfaktor
%- richtig berechnet wurde.
%-------------------------------------------------------------------------
if i == 1
   amp_rechts         = zeitdaten_roh(1:laenge_zeitdaten_roh,2);
   kali_fak_re        = m_k_bereich(1,1)
   amp_rechts_kali    = amp_rechts(1:wertezahl) * kali_fak_re;
   [B_re_th, F_re_th, T_re] = specgram(amp_rechts_kali, blockgroesse,     ↵
                              abtastrate, window, ueberlappung);
```

```
   B_re               = B_re_th(1:n_f,:);
   F_re               = F_re_th(1:n_f);
   [m, n]             = size(B_re);
   aps_lin_re              = (2.0 * fenster_flattop * abs(B_re) /         ↵
                              blockgroesse) / sqrt(2.0);
   aps_lin_re(1,1:n)       = aps_lin_re(1,1:n) ./ 2.0;
   aps_lin_mittel_re       = sqrt(sum(aps_lin_re.^2, 2)/n);
   aps_lin_mittel_dB_re    = 20. * log10(aps_lin_mittel_re ./ p_null);
   gp_aps_lin_mittel_re    = sqrt(1/epsilon_flattop *                     ↵
                             sum(aps_lin_mittel_re.^2));
   gp_aps_lin_mittel_dB_re = 20. * log10(gp_aps_lin_mittel_re ./ p_null);
   aps_dB_re            = [F_re, aps_lin_mittel_dB_re];
   subplot(2,2,3);
   plot(aps_dB_re(:,1), aps_dB_re(:,2));
     title(['Kalibriertes APS von Kanal: rechts; AVG: ', num2str(n_block),↵
     '; LpG [dB]: ', num2str(gp_aps_lin_mittel_dB_re,3)]);
     xlabel('f [Hz]');
     ylabel(['Lp [dB]']);
     grid;

elseif i == 2
   amp_links          = zeitdaten_roh(1:laenge_zeitdaten_roh,1);
   kali_fak_li        = m_k_bereich(2,1)
   amp_links_kali     = amp_links(1:wertezahl) * kali_fak_li;
   [B_li_th, F_li_th, T_li] = specgram(amp_links_kali, blockgroesse,      ↵
                              abtastrate, window, ueberlappung);
   B_li               = B_li_th(1:n_f,:);
   F_li               = F_li_th(1:n_f);
   [m, n]             = size(B_li);
   aps_lin_li              = (2.0 * fenster_flattop * abs(B_li) /         ↵
                              blockgroesse) / sqrt(2.0);
   aps_lin_li(1,1:n)       = aps_lin_li(1,1:n) ./ 2.0;
   aps_lin_mittel_li       = sqrt(sum(aps_lin_li.^2, 2)/n);
   aps_lin_mittel_dB_li    = 20. * log10(aps_lin_mittel_li ./ p_null);
   gp_aps_lin_mittel_li    = sqrt(1/epsilon_flattop *                     ↵
                             sum(aps_lin_mittel_li.^2));
   gp_aps_lin_mittel_dB_li = 20. * log10(gp_aps_lin_mittel_li ./ p_null);
   aps_dB_li            = [F_li, aps_lin_mittel_dB_li];
   subplot(2,2,4);
   plot(aps_dB_li(:,1), aps_dB_li(:,2));
     title(['Kalibriertes APS von Kanal: links; AVG: ', num2str(n_block), ↵
     '; LpG [dB]: ', num2str(gp_aps_lin_mittel_dB_li,3)]);
     xlabel('f [Hz]');
     ylabel(['Lp [dB]']);
     grid;

end %- if-Anweisung, Kontrolle

end %- if-Anweisung, Programmschleife
```

20.15.2 Wav_Analyse_Programm_auto.m

```
%-----------------------------------------------------------------------
%- Wav_Analyse_Programm_auto.m
%- Programm zur Analyse einer WAV-Datei
%- 29.05.2003 Terence Klitz
%-----------------------------------------------------------------------
%- Dieses Programm analysiert WAV-Dateien, die mit dem LabVIEW-Programm
%- zur Drehkanalmessung aufgenommen wurden. Nach Angabe des zu
%- analysierenden Kanals liest es automatisch die Messdateien ein.
%- Es muss die Textdatei mit den Kalibrierfaktoren vorliegen, wenn dies
%- nicht der Fall ist, wird der Kalibrierfaktor auf den Wert "1" gesetzt.
%- Diese Version ist so geschrieben, dass die Kalibrierdatei (_KALI)
%- des analysierten Kanals, die Messdateien (_MPXX) und die Dateien
%- der Hochfahrten (_HOCHXX) analysiert werden. Dazu sucht es in den
%- Dateinamen gezielt nach den Strings '_MP', '_KALI' und '_HOCH'.
%- Einstellungen s. u.a. Standardeinstellung.
%-
%- Berechnungen:
%- lin. APS [db] und Terzspektrums [dB]
%- Es erfolgt zudem eine A-Bewertung der Spektren.
%- Es wird eine Frequenzspanne von f_m = 16 Hz bis f_m = 12500 Hz
%- betrachtet (vgl. f_mn_a und f_mn_e).
%-
%- Vor der Analyse ist der zu analysierende Kanal der WAV-Datei anzugeben.
%- Am Ende der Analyse werden Spektren geplottet:
%- unbewertetes APS [dB], unbewertetes Terzspektrum [dB], zeitlicher
%- Verlauf des Gesamtschalldruckpegels.
%-
%- Dazu wird eine Auswahl von Ergebnissen in einer MAT-Datei angelegt.
%- Diese wird in einem MAT-Verzeichnis im Verzeichnis der WAV-Dateinen
%- abgespeichert
%- [Stammname]_[Kanal].MAT, mit [Kanal] = 're' oder 'li'
%- Der Inhalt der MAT-Datei wird im Queltext ihrer Erstellung angegeben. Es
%- können mit dem Programm Mat_lesen_darstellen.m nur die Ergebnisse
%- dargestellt werden, die in der MAT-Datei hinterlegt wurden.
%-
%- Es müssen Dateien im Stereoformat vorliegen.
%-----------------------------------------------------------------------

clear all;
close all;
clc;

%- Es wird mit den Dateien zu den Messpunkten MP begonnen, dabei ist es
%- wichtig, dass die Datei MP1 existiert und die übrigen in chronologischer
%- Reihenfolge folgen. Gleiches gilt für die HOCH-Dateien.
%- Danach werden die Dateien der Hochfahrten analysiert.
%- Zum Schluss werden die Kalibrierdateien herangezogen.
%- Die vorgegebenen Einstellungen werden für alle Dateien beibehalten.
%- Soll ein anderer Kanal analysiert werden, ist das Programm neu zu
%- starten.

%- Option, ob am Ende der Analyse jeder einzelnen Datei das APS in
%- einem eigenen Fenster angezeigt werden soll
darstellen = 0;   %- 1 Diagramme anzeigen; 0 keine Anzeige


ant = 'j';        %- Antwortvorgabe, damit die Schleife anläuft
%dat = 0;
while (ant == 'j') | (ant == 'J')
```

```
tic

%-----------------------------------------------------------------------
%- Wahl des Kanals der WAV-Datei, der analysiert werden soll;
%- diese Wahl ist notwendig, weil das Programm nur einen Kanal
%- analysiert.
%-----------------------------------------------------------------------
kanal = input('Bitte den zu analysierenden Kanal angeben ("rechts" oder    ↵
               "links"):', 's');

%-----------------------------------------------------------------------

%-----------------------------------------------------------------------
%- Programmeinstellungen
%- Standardeinstellung für ein Signal, das mit 44100 Hz abgetastet wurde:
%- Blockgröße von 32768 Werten
%- Divisor von 2.56
%-----------------------------------------------------------------------

format long g
divisor      = 2.56;       %- Es wird eine kleine Frequenzspanne als
                           %- 44100/2 Linien betrachtet.
fenster_typ  = 'hanning';  %- oder 'flattop'; für das Flattop-Fenster
                           %- muss die Flattop-Funktion [Haukap]
                           %- existieren (vgl.
                           %- Kalibrierfaktor_Kanal_bereich.m.
ueberlappung = 0;
p_null       = 2e-5;       % [Pa]

blockgroesse = 32768;
delta_t      = 0.3;        %- Zeitspanne für die GP(t)-Berechnug

f_mn_a       = 16;         %- Erste beachtete Terz (Nenn-Frequenz),
f_mn_e       = 12500;      %- letzte beachtete Terz (Nenn-Frequenz);
                           %- Dadurch das die Frequenzspanne durch
%- den Divisor dividiert wird, ist am Ende der f-Spanne darauf zu achten,
%- welche Terz noch gefüllt werden kann. Bei einem Divisor von 2,56 beträgt
%- die letzte Frequenz 17226,5625 Hz, das reicht nicht für das Terzband mit
%- f_m = 16000 Hz, wo f_2 = 17783 Hz beträgt. Die hier eingestellte
%- Frequenzspanne ist auch bei der Schmalbandanalyse zu beachten.

q = 10^(1/10);             %- Stufensprung für die Normreihe R10

%- Oktavmittenfrequenzen für die Achsbeschriftung
oktav_m = {'16'; ''; ''; '31,5'; ''; ''; '63'; ''; ''; '125'; ''; '';     ↵
'250'; ''; ''; '500'; ''; ''; '1000'; ''; ''; '2000'; ''; ''; '4000'; ''; ↵
''; '8000'; ''; ''; '16000'};

terz_string = ['Terzbereich [', num2str(f_mn_a), '; ', num2str(f_mn_e), ']↵
Hz'];
freq_string_1 = ['Frequenzspanne [', num2str(f_mn_a), '; ',              ↵
num2str(f_mn_e), '] Hz'];

%-----------------------------------------------------------------------
%- Vorbereiten der Terzbänder in dem angegebenen Frequenzbereich.
%-
%- Es wird gemäß DIN EN 61260 mit den exakten Terz-Bandmittenfre-
%- quenzen gerechnet. Aus diesen werden dann die oberen und unteren
%- Bandeckfrequenzen errechnet, nach denen die Frequenzlinien den
%- einzelnen Terzbändern zugeordnet werden.
%- Die Terzmittenfrequenzen sind nach der Normreihe R10 formuliert,
```

```
%- die mit dem Faktor q erstellt wird.
%-----------------------------------------------------------------------

%- Da die exakten Terzmittenfrequenzen nicht den Nennfrequenzen
%- entsprechen, wird als Abbrechkriterium f_2 auf Grundlage von f_mn_e
%- genommen.
f_abbrech = f_mn_e * sqrt(q);
f_m_start = 10;                         %- Erste Terzmittenfrequenz
i = 1;
f_m(1) = f_m_start;
while f_m <= f_abbrech                  %- exakte Terzmittenfrequenzen
    i = i + 1;                          %- berechnen
    f_m(i) = f_m(i-1) * q;
end %- while-Anweisung

%- Nenn-Terzmittenfrequenzen
f_mn = [10 12.5 16 20 25 31.5 40 50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 ↵
630 800 1000 1250 1600 2000 2500 3150 4000 5000 6300 8000 10000 12500     ↵
16000 20000];

%- Zu f_mn zugehörige dB-A-Werte
%- Korrekturwerte für die A-Bewertung
dba_stuetz = [-70.4 -63.4 -56.7 -50.5 -44.7 -39.4 -34.6 -30.2 -26.2       ↵
-22.5 -19.1 -16.1 -13.4 -10.9 -8.6 -6.6 -4.8 -3.2 -1.9 -0.8 0 0.6 1      ↵
 1.2 1.3 1.2 1 0.5 -0.1 -1.1 -2.5 -4.3 -6.6 -9.3];

%- Vorgegebenen Terzmittenfrequenzbereich aus f_mn entnehmen
%- Start bei f_mn_a
%- Ende bei f_mn_e
index_a = find(f_mn == f_mn_a);
index_e = find(f_mn == f_mn_e);

f_mnenn = f_mn(index_a : index_e);

%- Auf den Bereich f_mn_a bis f_mn_e angepasste exakte Mittenfrequenzen
%- Mittenfrequenzen des vorgegebenen Bereiches holen
f_m = f_m(index_a : index_e);

%- Zugehörige Bandeckfrequenzen f_1 und f_2 berechnen
for i = 1 : length(f_m)
    f_1(i)  = f_m(i) / sqrt(q);
    f_2(i)  = f_m(i) * sqrt(q);
    band(i) = f_2(i) - f_1(i);
end %- for-Schleife

%- Aufgrund von f_mn_a und f_mn_e und den errechneten
%- Bandeckfrequenzen steht nun die Frequenzspanne fest.
f_start = f_1(1);
f_ende  = f_2(length(f_2));
%-----------------------------------------------------------------------
%-----------------------------------------------------------------------
%- Einlesen der ersten WAV-Datei und des Kalibrierfaktors
%- Erstellen eines MAT-Verzeichnisses.
%-----------------------------------------------------------------------

%- Stammname ermitteln
fenstertitel      = strcat('Erste WAV-Datei wählen [MP1], Kanal: ', kanal);
[dateiname, pfad] = uigetfile('*.wav', fenstertitel);

laenge_dateiname  = length(dateiname);

%- Stammnamen extrahieren
```

```
dateiname
index1 = findstr(dateiname,'_MP');
%- Ist es eine Messpunktdatei ?
if index1
    index = index1
else index2 = findstr(dateiname,'_KALI');
    %- Ist es eine Kalibrierdatei
    if index2
        index = index2
    else index3 = findstr(dateiname,'_HOCH');
        %- Ist es eine Datei der Hochfahrt ?
        if index3
            index = index3
        %- Wenn nichts zutrifft, dann wird der gesamte Dateiname als
        %- Stammname genommen.
        else index = length(dateiname)-3
        end %- if-Anweisung
    end %- if-Anweisung
end %- if-Anweisung
index;
stammname = dateiname(1:(index-1))


%- Der Stammname wird für den Verzeichnisnamen der MAT-Dateien übernommen
dir_erw = stammname;


%- Zu öffnende Textdatei mit den Kalibrierfaktoren, wenn sie vorhanden ist
textdatei = strcat(pfad, stammname,'_Kalibrierfaktor.txt');

%- Existitert die Textdatei mit den Kalibrierfaktoren ?
dat_exist = exist(textdatei)
%- Wenn die Datei existiert, lade sie
if dat_exist > 0
    [zahl_1, string_1, zahl_2, string_2] =                              ↵
                                    textread(textdatei,'%f\t%s\n%f\t%s');
    if strcmp(string_1, kanal)
       kalibrierfaktor = zahl_1
    elseif strcmp(string_2, kanal)
       kalibrierfaktor = zahl_2
    end %- if-Anweisung
else
    %- Wenn die Datei nicht existiert, dann setze den Kalibier faktor auf
    %- den Wert 1
    disp('ACHTUNG: Keine Kalibrierfaktoren !');
    kalibrierfaktor = 1
end %- if-Anweisung

%- MAT Verzeichnis erstellen, mit dem Namen dir_erw
switch kanal
case 'rechts'
    ka = '_re';
case 'links'
    ka = '_li';
otherwise
    disp('Kein Kanal');
end

dir_name = strcat(dir_erw, '_MAT', ka);
[status, msg] = mkdir (pfad, dir_name);
if (status == 1) | (status == 2)  %- Verzeichnis wurde erfolgreich
                                  %- erstellt (1) oder existiert
```

```
                                    %- bereits (2)
    pfad_2 = strcat(pfad, '\', dir_name, '\');
else
    pfad_2 = pfad;
    disp(['ACHTUNG, speicher die MAT-Dateien in: ', pfad]);
                                    %- Das Verzeichnis konnte nicht
                                    %- erstellt werden, die MAT-Dateien
                                    %- werden im Verzeichnis der WAV-
                                    %- Dateien abgelegt.
end

%-------------------------------------------------------------------------
%- Untersuchen, welche Dateien vorhanden sind
%-------------------------------------------------------------------------

u = 0; %- Index für MP
v = 0; %- Index für HOCH
w = 0; %- Index für KALI

ok = 1;
while ok == 1
    u = u + 1;
    name = strcat(pfad, stammname, '_MP', num2str(u), '.WAV');
    dat_exist = exist(name);
    if dat_exist > 0
        %- MP-Datei vorhanden
        MP(u) = u;
        ok = 1;
    else
        ok = 0;
        disp('Entweder keine MP1-Datei oder gar keine MP-Datei vorhanden');
        MP(u) = 0;
    end %- if-Anweisung
end %- while-Schleife

ok = 1;
while ok == 1
    v = v + 1;
    name = strcat(pfad, stammname, '_HOCH', num2str(v), '.WAV');
    dat_exist = exist(name);
    if dat_exist > 0
        %- HOCH-Datei vorhanden
        HOCH(v) = v;
        ok = 1;
    else
        ok = 0;
        disp('Entweder keine HOCH1-Datei oder gar keine HOCH-Datei        ↵
              vorhanden');
        HOCH(v) = 0;
    end %- if-Anweisung
end

ok = 1;
while ok == 1
    w = w + 1;
    name = strcat(pfad, stammname, '_KALI', ka, '.WAV');
    dat_exist = exist(name);
    if dat_exist > 0
        %- KALI-Datei vorhanden
        KALI(w) = w;
        ok = 0;
    else ok = 0;
```

```
        ok = 0;
        disp(['Entweder keine KALI', ka, '-Datei oder gar keine KALI-Datei↵
               vorhanden']);
        KALI(v) = 0;
    end %- if-Anweisung
end %- while-Schleife

MP
HOCH
KALI

%- Anzahl der zu analysierenden Dateien
anzahl = max(MP) + max(HOCH) + max(KALI);

display (['Es wird (werden)', num2str(anzahl), ' Datei(en) analysiert.
Bitte haben Sie Geduld.']);

%-----------------------------------------------------------------------
%- Beginn der automatischen Analyseschleife
%- Start mit automatischem Laden der jeweiligen Datei (Menge = anzahl)
%-----------------------------------------------------------------------

for d = 1 : anzahl

if d > 1
clear zeitdaten_roh abtastrate bits zeitdaten_Pa B_th F_th T B_gesamt     ↵
F_gesamt F_bereich aps_lin_Pa_gesamt aps_lin_mittel_Pa_gesamt             ↵
gp_aps_lin_mittel_Pa_gesamt aps_lin_mittel_dB_gesamt                      ↵
aps_lin_mittel_dB_A_gesamt gp_aps_lin_mittel_dB_gesamt                    ↵
gp_aps_lin_mittel_dB_A_gesamt aps_lin_Pa_bereich aps_lin_mittel_Pa_bereich↵
gp_aps_lin_mittel_Pa_bereich aps_lin_mittel_dB_bereich                    ↵
aps_lin_mittel_dB_A_bereich gp_aps_lin_mittel_dB_bereich                  ↵
gp_aps_lin_mittel_dB_A_bereich gp_z terz_i terz_i_anz tabelle amp_terz_dB ↵
amp_terz_dB_A gp_terz_dB f_stairs amp_terz_spek log_f_stairs log_f_mn;
end


    display(['Analyse von Datei Nummer: ', num2str(d)]);
    if d <= max(MP)
        erweit = strcat('_MP', num2str(MP(d)));
    elseif (d > max(MP)) & (d <= (max(MP) + max(HOCH)))
        erweit = strcat('_HOCH', num2str(HOCH(d - max(MP))));
    else
        erweit = strcat('_KALI', ka);
    end %- for

dateiname = strcat(stammname, erweit, '.WAV');
datei_string = strcat(pfad, dateiname)
[zeitdaten_roh, abtastrate, bits] = wavread(datei_string);

laenge_zeitdaten_roh = length(zeitdaten_roh);
n_block              = (laenge_zeitdaten_roh - mod(laenge_zeitdaten_roh,  ↵
                        blockgroesse)) / blockgroesse;
wertezahl            = n_block * blockgroesse;

switch lower(kanal)
    case {'rechts'}
        zeitdaten_Pa = zeitdaten_roh(1:wertezahl,2) * kalibrierfaktor;
    case {'links'}
        zeitdaten_Pa = zeitdaten_roh(1:wertezahl,1) * kalibrierfaktor;
    otherwise
```

```
        display('Fehler');
        hold
end %- switch

%-----------------------------------------------------------------------

switch fenster_typ
case 'hanning'
    fenster_typ
    window     = hanning(blockgroesse);
    fenster    = 2;
    epsilon    = 1.5;
case 'flattop'
    fenster_typ
    windos     = flattop(blockgroesse);
    fenster    = 4.688600988;
    epsilon    = 3.83;
end %- if-Anweisung

%- Aus den Zeitdaten werden nun soviele Werte übernommen, wie ganze Blöcke
%- hineinpassen. Es passen n_block mal ganze Blöcke in die Zeitdaten-
%- Matrix.

laenge_zeitdaten_Pa  = length(zeitdaten_Pa);
dauer                = laenge_zeitdaten_Pa / abtastrate;    % [s]
dauer_block          = blockgroesse / abtastrate;           % [s]
delta_f              = 1 / dauer_block;                     % [Hz]
mittelungsanzahl     = n_block;

%- Frequenzspanne ermitteln
f_min    = 0;

%- Theoretische Maximalfrequenz
f_max_th = abtastrate / divisor;

%- Maximalfrequenz, die mit delta_f erfasst wird
f_max    = f_max_th - mod(f_max_th, delta_f);

%- delta_f passt n-mal in f_max, es gibt aber n+1 Stützstellen
n_f      = f_max / delta_f + 1;

%- Matrix mit den abgedeckten Frequenzen
frequenzen = linspace(f_min, f_max, n_f);

%- Spline für die A-Bewertung erzeugen
%- Es wird aufgrund der dbA-Stützstellen und des Frequenzbereiches
%- "frequenzen" eine Ausgleichskurve erzeugt und für jeden Frequenz-
%- wert ein dBA-Korrekturwert abgelegt

Lp_A_spl_gesamt = (spline(f_mn, dba_stuetz, frequenzen))';


freq_string_2 = ['Frequenzspanne [', num2str(f_min), '; ',num2str(f_max), ↵
                 '] Hz'];

%-----------------------------------------------------------------------

%-----------------------------------------------------------------------
%- Berechnung des linearen APS über die Funktion <specgram>
%- Im Nachfolgenden wird zwischen dem Frequenzbereich (_bereich) und
%- dem gesamten Frequenzbereich (_gesamt) unterschieden. Der vorgege-
%- bene Frequenzbereich (_bereich) wird durch den angegebenen Terz-
```

```
%- bereich bestimmt.
%-------------------------------------------------------------------

[B_th, F_th, T] = specgram(zeitdaten_Pa, blockgroesse, abtastrate,window, ↵
                  ueberlappung);

%-------------------------------------------------------------------

%- Indizes für die Bereichsbeschreibung
index_f_start = find(F_th >= f_start);
index_f_ende  = find(F_th <= f_ende);

index_f_start = index_f_start(1);
index_f_ende  = index_f_ende(length(index_f_ende));

%-------------------------------------------------------------------

%- Spektrum und Frequenzen des gesamten Bereiches
B_gesamt = B_th(1:n_f,:);
F_gesamt = F_th(1:n_f);
erste  = F_gesamt(1)
letzte = F_gesamt(length(F_gesamt))

%- Dimensionen von B_gesamt
%- m = Anzahl der Linien
%- n = Anzahl der Spektren
[m, n]    = size(B_gesamt);

%-------------------------------------------------------------------

%- Frequenzen des vorgegebenen Bereiches
F_bereich = F_th(index_f_start : index_f_ende,:);

%-------------------------------------------------------------------

%-------------------------------------------------------------------
%- Lineares APS
%-------------------------------------------------------------------
%- Das APS kann aus der Multiplikation der FFT mit ihrer konjugiert
%- komplexen berechnet werden. Daraus geht dann das quadratische APS
%- hervor [V^2]. Das lineare APS erhält man, indem aus dem quadra-
%- tischen APS die Wurzel gezogen wird, oder das APS über die Betrags-
%- bestimmung der komplexen Elemente in der FFT-Matrix B ermittelt
%- wird. Der zweite Weg wird hier angewendet.
%-------------------------------------------------------------------

aps_lin_Pa_gesamt = (2.0 * fenster * abs(B_gesamt) / blockgroesse) /      ↵
                     sqrt(2.0);

%- Der Faktor 2.0 ersetzt die theoretisch durchzuführende Addition
%- der Amplituden des negativen und positiven Frequenzbereiches,
%- was bei reellen Signalen zulässig ist.
%- Der Fensterfaktor (fenster) macht die Normierung des
%- angewendeten Wichtungsfensters rückgänig.
%- Mit der Division durch sqrt(2.) werden RMS-Amplituden berechnet.

%- Gesonderte Beachtung des Gleichanteils
%- Dies ist nur zu beachten, wenn die Frequenzspanne bei 0 Hz beginnt.
%- Der Gleichanteil kommt nur einmal vor, darf also nicht mit
%- dem Faktor 2. vervielfacht werden.
aps_lin_Pa_gesamt(1,1:n) = aps_lin_Pa_gesamt(1,1:n) ./ 2.0;
%- Mitteln des APS
```

```
%- Es liegt ein lineares APS vor, also muss quadratisch gemittelt
%- werden.
aps_lin_mittel_Pa_gesamt = sqrt(sum(aps_lin_Pa_gesamt.^2, 2)/n);

%-------------------------------------------------------------------
%- Bearbeitung des gesamten Frequenzbereiches
%- Die Ergebnisse zum gesamten Frequenzbereich sind durch
%- "_gesamt" gekennzeichnet
%-------------------------------------------------------------------

%- Berechnung des Gesamtpegels des gesamten APS-Bereiches
gp_aps_lin_mittel_Pa_gesamt  = sqrt(1/epsilon * ↵
sum(aps_lin_mittel_Pa_gesamt.^2));


%- Schalldruckpegel berechnen, in dB für den gesamten Bereich
aps_lin_mittel_dB_gesamt    = 20. * log10(aps_lin_mittel_Pa_gesamt ./     ↵
                              p_null);
gp_aps_lin_mittel_dB_gesamt = 20. * log10(gp_aps_lin_mittel_Pa_gesamt ./  ↵
                              p_null);

%-------------------------------------------------------------------
%- A-Bewertung
aps_lin_mittel_dB_A_gesamt = aps_lin_mittel_dB_gesamt + Lp_A_spl_gesamt;

%- Amplituden aus aps_lin_mittel_dB_A_gesamt für gp_ges in dB(A)
amp_A_Pa_gesamt     = 10.^(aps_lin_mittel_dB_A_gesamt ./ 20) * p_null;
gp_lin_A_Pa_gesamt  = sqrt(1/epsilon * sum(amp_A_Pa_gesamt.^2));
gp_aps_lin_mittel_dB_A_gesamt = 20. * log10(gp_lin_A_Pa_gesamt ./ p_null);
%-------------------------------------------------------------------

%-------------------------------------------------------------------
%- Zeitabhängiger GP

%- Abstand der abgetasteten Punkte
dt = 1/abtastrate;

%- Anzahl der delta_t im Zeitsignal
n_delta_t = (dauer-mod(dauer, delta_t))/delta_t;
disp(['Berechnung von ', num2str(n_delta_t), ' Gesamtpegeln']);

%- Anzahl der dt in delta_t
%- Über dt wird dann delta_t formuliert damit liegt man direkt im
%- Abtastraster
n_dt_delta_t = (delta_t-mod(delta_t, dt))/dt;

%- Formulierung von delta_t durch dt
delta_t_dt = n_dt_delta_t * dt;

for i = 1 : n_delta_t
    i_s = (i-1) * n_dt_delta_t + 1;
    i_e = i * n_dt_delta_t;
    %- Zeitachse
    gp_z(i,1) = i * delta_t_dt;
    %- Gesamtpegel
    gp_z(i,2) = 20.*log10(sqrt(1/n_dt_delta_t *                          ↵
                sum(zeitdaten_Pa(i_s:i_e).^2))/p_null);
end
%-------------------------------------------------------------------


%-------------------------------------------------------------------
```

```
%- Bearbeitung des vorgegebenen Frequenzbereiches
%- Die Ergebnisse des zum gesamten Frequenzbereich sind durch
%- "_bereich" gekennzeichnet
%-------------------------------------------------------------------

%- Bereichswahl für die A-Korrekturwerte
Lp_A_spl_bereich          = Lp_A_spl_gesamt(index_f_start : index_f_ende);

%- Bereichswahl
aps_lin_mittel_Pa_bereich = aps_lin_mittel_Pa_gesamt(index_f_start :      ↵
                            index_f_ende);

%- Berechnung des Gesamtpegels des vorgegebenen APS-Bereiches
gp_aps_lin_mittel_Pa_bereich  = sqrt(1/epsilon *                          ↵
                                sum(aps_lin_mittel_Pa_bereich.^2));

%- Schallpegel berechnen in dB für den vorgegebenen Bereich
aps_lin_mittel_dB_bereich    = 20. * log10(aps_lin_mittel_Pa_bereich ./   ↵
                               p_null);
gp_aps_lin_mittel_dB_bereich = 20. * log10(gp_aps_lin_mittel_Pa_bereich ./↵
                               p_null);

%-------------------------------------------------------------------
%- A-Bewertung
aps_lin_mittel_dB_A_bereich = aps_lin_mittel_dB_bereich + Lp_A_spl_bereich;

%- Amplituden aus aps_lin_mittel_dB_A_ges für GP_ges in dB(A)
amp_A_Pa_bereich     = 10.^(aps_lin_mittel_dB_A_bereich ./ 20) * p_null;
gp_lin_A_Pa_bereich  = sqrt(1/epsilon * sum(amp_A_Pa_bereich.^2));
gp_aps_lin_mittel_dB_A_bereich = 20. * log10(gp_lin_A_Pa_bereich ./       ↵
                                 p_null);
%-------------------------------------------------------------------

%-------------------------------------------------------------------
%- Wann wird ein Terzband berücksichtigt:
%- 1) In diesem Programm wird die Frequenzspanne fest vorgegeben, die
%-    darin enthaltenen Terzbänder müssen berücksichtigt werden. Wie
%-    viele Linien dann im untersten Terzband enthalten sind hängt von
%-    der Frequenzauflösung und damit von der Blockgröße ab.
%- 2) Das Terzband muss unter Berücksichtigung von delta_f komplett
%-    gefüllt sein.
%-    2a) Bezüglich f_1 heisst das, dass die Linie entweder auf f_1
%-        liegt oder max. um delta_f von f_1 entfernt ist.
%-    2b) Bezüglich f_2 gilt entsprechendes, wobei hier die Linie
%-        nicht auf f_2 liegen darf, denn dann wird sie dem
%-        nachfolgenden Terzband zugeschrieben.
%-    Die Entfernung um max. delta_f gilt in Richtung der jeweiligen
%-    Terzmittenfrequenz, was dadurch berücksichtigt ist, das pro
%-    Terzband Frequenzen herausgesucht werden, die im Intervall
%-    [f_u; f_o[ liegen,
%- Zur Bestimmung der Pegel der Terzbänder müssen die Pegel der
%- Frequenzen, die im jeweiligen Terzband liegen energetisch addiert
%- werden.
%-------------------------------------------------------------------

h = 0;
%- Für jedes einzelne Terzband werden die Linien addiert.
for i = 1 : length(f_m)

    %- Suche die Indizes der Frequenzen, die in das jeweilige Band
    %- hineinpassen.
    terz_i = find (F_gesamt >= f_1(i) & F_gesamt < f_2(i));
```

```
    %- Anzahl der Frequenzlinien im aktuellen Terzband
    terz_i_anz = length(terz_i);
    tabelle(i,1) = f_mnenn(i);
    tabelle(i,2) = f_m(i);
    tabelle(i,3) = f_1(i);
    tabelle(i,6) = f_2(i);
    %- Prüfen, ob das Band gefüllt ist
    if (F_gesamt(terz_i(1)) - f_1(i) <= delta_f) & (f_2(i) -              ↲
                                F_gesamt(terz_i(terz_i_anz)) <= delta_f)
        % f_1 enthält Informationen über die verwirklichten Terzbänder
       tabelle_inhalt = ['f_mnenn | f_m | f_1 | f_1_ist | index_f_1 | f_2 ↲
         | f_2_ist | index_f_2 | Anz.Linien | Lp_Terz_dB | Lp_Terz_dB(A)'];
        tabelle(i,4) = F_gesamt(terz_i(1));
        tabelle(i,5) = terz_i(1);
        tabelle(i,7) = F_gesamt(terz_i(terz_i_anz));
        tabelle(i,8) = terz_i(terz_i_anz);
        tabelle(i,9) = terz_i_anz;
        for k = 1 : terz_i_anz
            summe_terz = sum(aps_lin_mittel_Pa_gesamt(terz_i(1) :        ↲
                         terz_i(terz_i_anz)).^2);
            korrigiert = summe_terz / epsilon;
            wurzel     = sqrt(korrigiert);
            amp_terz_dB(i) = 20 * log10 (wurzel / p_null);
        end %- for-Schleife
        tabelle(i,10) = amp_terz_dB(i);
    else %- Band nicht gefüllt
        tabelle(i,4)  = 0;
        tabelle(i,5)  = 0;
        tabelle(i,7)  = 0;
        tabelle(i,8)  = 0;
        tabelle(i,9)  = 0;
        tabelle(i,10) = 0;
    end %- if-Anweisung
end %- for-Schleife

%- Gesamtschalldruckpegel aus dem Terzspektrum
gp_terz_dB = 10*log10( sum( 10.^(amp_terz_dB(:)./10)));

%-------------------------------------------------------------------------
%- Die A-Bewertung des Terzspektrums
start_index = find(f_mn == tabelle(1,1));
stop_index  = find(f_mn == tabelle(length(tabelle),1));

%- amp_terz_dB_A = amp_terz_dB; % Rückrechnen
amp_terz_dB_A = amp_terz_dB + dba_stuetz(start_index:stop_index);
tabelle(:,11) = amp_terz_dB_A';

%- Gesamtschalldruckpegelpegel aus dem Terzspektrum A-bewertet
gp_terz_dB_A = 10*log10( sum( 10.^(amp_terz_dB_A(:)./10)));
%-------------------------------------------------------------------------

%-------------------------------------------------------------------------
%- Vorbereiten der Darstellungen
%-------------------------------------------------------------------------
%- Für die Darstellung mit <stairs> muss am Ende ein zusätzlicher
%- Stützpunkt eingefügt werden (bei f_2) der den Pegelwert des
%- letzen f_1-Punktes hat
%-------------------------------------------------------------------------

%- Nehme alle f_1-Werte aus tabelle
f_stairs = tabelle(:,3);
```

```
%- Füge an die Liste der f_1-Werte den letzen f_2-Wert an
f_stairs((length(f_stairs))+1) = tabelle(length(tabelle),6);
amp_terz_spek = amp_terz_dB;

%- Logarithmierte Frequenzlisten
log_f_stairs = log10(f_stairs);
log_f_mn     = log10(f_mn(index_a : index_e+1));

%- Füge an die Liste der Pegelwerte den letzten Pegel an.
amp_terz_spek((length(amp_terz_spek)+1)) =                                    ↵
                                        amp_terz_dB(length(amp_terz_dB));


if darstellen == 1

   figure(d)
   set(gcf,'name', datei_string);
   aps_dB = [F_gesamt, aps_lin_mittel_dB_gesamt];
   plot(aps_dB(:,1), aps_dB(:,2));
   title(['Datei: ', datei_string, ' | Unbewertetes APS | Kanal: ',kanal, ↵
  ' | AVG = ', num2str(n_block,3), ' | GP:                                ↵
  ',num2str(gp_aps_lin_mittel_dB_gesamt,'%5.1f'),' dB<rms> | ',             ↵
  freq_string_2, ' | Fenster: ', fenster_typ, ' | Überlappung: ',           ↵
  num2str(ueberlappung), ' % | k: ',num2str(kalibrierfaktor), ' Pa/EU |     ↵
  deltaf: ', num2str(delta_f), ' Hz |  Blk.: ', num2str(blockgroesse), ' |↵
  f_ab :', num2str(abtastrate), ' Hz']);
   xlabel('f [Hz]');
   ylabel('Lp [dB<rms>]');
   set(gca, 'xlim', [tabelle(1,3), tabelle((length(tabelle)),6)]);
   set(gca,'fontsize', 10);
   set(gca,'ygrid', 'on');
   set(gca,'xgrid', 'on');
end

%-------------------------------------------------------------------------
%- Ergebnisdatei erstellen
%-------------------------------------------------------------------------

ergebnisdatei = strcat(stammname, erweit, ka, '.MAT');
ergebnis = strcat(pfad_2, ergebnisdatei)
save(ergebnis, 'F_gesamt', 'F_bereich', 'divisor', 'blockgroesse',          ↵
'abtastrate', 'stammname', 'kanal', 'kalibrierfaktor', 'fenster_typ',       ↵
'mittelungsanzahl', 'delta_f', 'frequenzen', 'delta_t', 'n_delta_t',        ↵
'dauer', 'gp_z', 'ueberlappung','aps_lin_mittel_Pa_gesamt',                 ↵
'aps_lin_mittel_dB_gesamt', 'aps_lin_mittel_dB_A_gesamt',                   ↵
'gp_aps_lin_mittel_dB_gesamt', 'gp_aps_lin_mittel_dB_A_gesamt',             ↵
'aps_lin_mittel_Pa_bereich', 'aps_lin_mittel_dB_bereich',                   ↵
'aps_lin_mittel_dB_A_bereich', 'gp_aps_lin_mittel_dB_bereich',              ↵
'gp_aps_lin_mittel_dB_A_bereich', 'tabelle', 'tabelle_inhalt',              ↵
'gp_terz_dB', 'gp_terz_dB_A', 'log_f_stairs', 'log_f_mn', 'oktav_m');
%-------------------------------------------------------------------------

end %- Der for-Schleife der automatischen Dateianalyse
toc

ant = input('Eine weitere Datei analysieren ? (j / n)', 's');

end %- Programmende
```

20.15.3 Mat_multiread_Mittelung.m

```
%-----------------------------------------------------------------
%- Mat_multiread_Mittelung.m
%- Programm zum Einlesen und Mitteln der MAT-Ergebnisdateien
%- 17.03.2003 Terence Klitz
%-----------------------------------------------------------------
%- Mit diesem Programm werden die APS, die Terzspektren LpG(t)-Diagramme
%- der eingelesenen MAT-Dateien gemittelt.
%- Für jeden eingelesen Dateisatz wird eine MAT-Datei mit
%- den gemittelten Werten ausgegeben. Die Dateien des Satzes
%- werden nacheinander eingelesen.
%-
%- Hintergrund sind die Messungen am Drehkanal.
%- Es wurden bei einer Drehkanalkonfiguration mehrere Aufnahmen
%- bei Rechts- und Linksdrehungen durchgeführt. Zur Reduktion
%- der Datenmengen wurde überlegt, die Spektren der Rechtsdrehung
%- und der Linksdrehung jeweils zu mitteln.
%-
%- Am Ende eines Durchlaufs wird eine MAT-Datei mit den
%- gemittelten Werten geschrieben:
%- [Stammname]mittel_[anhang].MAT
%- Der String „anhang“ muss eingegeben werden.
%- Nach einem Durchlauf kann ein neuer Satz Dateien eingelesen
%- werden, der gemittelt werden soll.
%-----------------------------------------------------------------

clear all;
close all;
clc;

ant_satz = 1;
satz = 0;

while ant_satz == 1
   close all;
   %- Angabe einer Beschreibung, diese wird dem Dateinamen hinzugefügt
   %- Bitte auch die Information über den Kanal angeben, weil diese
   %- nicht automatisch beigefügt wird.
   anhang = input('Beschreibung des Satzes: ','s');
   satz = satz + 1;

   newplot
   hold off
   m_1 = menu('Bitte machen Sie eine Wahl', 'MAT-Datei einlesen',        ↵
         'Abbruch');
   i = 0;
   k = 0;
   if m_1 == 1; %- MAT-Datei einlesen
       ant_dat = 1
          while ant_dat == 1
            i = i + 1;
            k = k +1;

            [dateiname, pfad] = uigetfile('*.mat', 'MAT-Ergebnisdatei    ↵
                                wählen');
            mat_datei = strcat(pfad,dateiname);
            load(mat_datei);
            cd(pfad);
```

```
legend_string = strcat('\', dateiname, ' (GP:',                    ↵
num2str(gp_aps_lin_mittel_dB_gesamt,'%5.1f'), ' dB) ', 'AVG: ', ↵
num2str(mittelungsanzahl));
  string_matrix(i).name = legend_string;

  dateien(i,1:length(mat_datei)) = mat_datei;

  f_min = F_gesamt(1);
  f_max = F_gesamt(length(F_gesamt));

  aps_matrix(:,i) = aps_lin_mittel_dB_gesamt;


  if exist('gp_zeit')
      if length(gp_zeit) < length(gp_z)
  %- Kommt eine längere Matrix, dann kürze die eingehende Matrix
          gp_zeit(:,i) = gp_z(1:length(gp_zeit),2);
          zeit(:,1) = gp_z(1:length(gp_zeit),1);
      elseif length(gp_zeit) > length(gp_z)
  %- Kommt eine kürzere Metrix, dann kürze die bestehende Matrix
          gp_zwischen = gp_zeit(1:length(gp_z),:);
          clear gp_zeit;
          gp_zeit = gp_zwischen;
          gp_zeit(:,i) = gp_z(:,2);

          zeit_zwischen = zeit(1:length(gp_z),:);
          clear zeit;
          zeit(:,1) = zeit_zwischen;gp_z(:,1);
          zeit(:,1) = gp_z(:,1);
      elseif length(gp_zeit) == length(gp_z)
  %- Ist die eingehende Matrix gleich lang mit der bestehenden,
  %- dann übernehme sie einfach
          gp_zeit(:,i) = gp_z(:,2);
          zeit(:,1) = gp_z(:,1);
      end
  else
      gp_zeit(:,i) = gp_z(:,2);
      zeit(:,1) = gp_z(:,1);
  end
  size(gp_z)
  size(gp_zeit)
  t_min = zeit(1,1);
  t_max = zeit(length(zeit),1);

  figure(1);
  freq_string_2 = ['Frequenzspanne [', num2str(f_min), '; ',    ↵
                   num2str(f_max), '] Hz'];

  tab_dB(:,i) = tabelle(:,10);

  if k == 7;
      k = 1;
  end

  farben = ['b' 'r' 'k' 'g' 'm' 'c' ];

  %- APS
  figure(1);
  plot(F_gesamt, aps_matrix(:,i), 'color', farben(k) );
  %- farben = input('Farbe ("k" "r" "b" "g" "m" "c"): ', 's');
  %- plot(F_gesamt, aps_lin_mittel_dB_gesamt, 'color', farben );
```

```
        title(['\ Unbewertete APS | Kanal: ', kanal, ' | ',
        freq_string_2, '  Fenster: ', fenster_typ, ' | Überlappung: ',
        num2str(ueberlappung), ' % | k: ',num2str(kalibrierfaktor), '
        Pa/EU | delta_f: ', num2str(delta_f), ' Hz | f_ab :',
        num2str(abtastrate), ' Hz']);
         xlabel('f [Hz]');
         ylabel('Lp [dB]');
         grid on;
         set(gca, 'xlim', [f_min, f_max]);
         legend(string_matrix(:).name);
         hold on;

         %- LpG(t)
         figure (2);
         plot(zeit, gp_zeit(:,i), 'color', farben(k) );
         title(['\ GP in Abhängigkeit der Zeit | Kanal: ', kanal, ' |
         Fenster: ', fenster_typ, ' | Überlappung: ',
         num2str(ueberlappung), ' % | k: ',num2str(kalibrierfaktor),
         ' Pa/EU | delta_t: ', num2str(delta_t), 's | nfft: ',
         num2str(blockgroesse), ' | f_ab :', num2str(abtastrate), '
         Hz']);
         xlabel('t [s]');
         ylabel('GP [dB]');
         grid on;
         set(gca, 'xlim', [0, t_max]);
         set(gca, 'ylim', [0, (max(gp_zeit(:,i))+5)]);
         legend(string_matrix(:).name);
         hold on

         %- Terzspektrum
         amp_terz_spek = tabelle(:,10);
         amp_terz_spek((length(amp_terz_spek)+1)) =
                                        tabelle(length(tabelle),10);
         terz_string = ['Terzmittelfrequenzen [',num2str(tabelle(1,1)),
         '; ', num2str(tabelle(length(tabelle),1)), ']'];
         gp_terz_dB = 10*log10( sum( 10.^(tabelle(:,10)./10)));

         figure(3);
         set(gcf,'name', dateiname);

         stairs(log_f_stairs, amp_terz_spek, farben(k));
         title(['Unbewertetes Terzspektrum; Kanal: ', kanal, ';AVG = ',
         num2str(mittelungsanzahl,3), '; GP: ',
         num2str(gp_terz_dB,'%5.1f'), ' dB<rms>; ', terz_string]);
         xlabel('f [Hz]');
         ylabel('Lp [dB<rms>]');
         set(gca, 'xlim', [log_f_stairs(1),
         log10(tabelle(length(tabelle),6))]);
         set(gca, 'xscale', 'linear');
         set(gca, 'xtick', log_f_mn);
         set(gca, 'xticklabel', oktav_m);
         set(gca, 'fontsize', 10);
         set(gca, 'xgrid', 'on');
         set(gca, 'ygrid', 'on');
         hold on

         ant_dat = menu('Weitere Datei', 'Weitere Datei einlesen',
         'Abbruch');
      end %- while-Schleife
   elseif m_1 ==2
```

```
    end
anzahl_mess = i;

%- Berechnung der Mittelwerte

aps_mittel      = 10*log10(sum((10.^(aps_matrix./10)),2)) -              ↵
                  10*log10(length(aps_matrix(1,:)));
gp_zeit_mittel  = 10*log10(sum((10.^(gp_zeit./10)),2)) -                 ↵
                  10*log10(length(gp_zeit(1,:)));
tab_dB_mittel   = 10*log10(sum((10.^(tab_dB./10)),2)) -                  ↵
                  10*log10(length(tab_dB(1,:)));

gp_mittel = 10*log10(sum((10.^(gp_zeit_mittel./10)))) -                  ↵
            10*log10(length(gp_zeit_mittel));

%- Vorschau der Diagramme anzeigen
figure(1)
plot(F_gesamt, aps_mittel, 'linewidth', 2, 'color', 'k');
figure(2)
plot(zeit, gp_zeit_mittel, 'linewidth', 2, 'color', 'k');
figure(3)
amp_terz_spek = tab_dB_mittel;
amp_terz_spek((length(amp_terz_spek)+1)) =                               ↵
                                    tab_dB_mittel(length(tab_dB_mittel));
stairs(log_f_stairs, amp_terz_spek, 'k');


%- Umbenennen, damit die Dateien auch mit dem Leseprogramm
%- Mat_lesen_darstellen.m gelesen werden können.

clear aps_lin_mittel_dB_gesamt gp_z;

aps_lin_mittel_dB_gesamt = aps_mittel;
gp_z(:,1) = zeit(:);
gp_z(:,2) = gp_zeit_mittel(:);
tabelle(:,10) = tab_dB_mittel(:);
F_bereich = [0];

mittel_datei = strcat(pfad, stammname, 'mittel_', anhang, '.MAT');
save (mittel_datei, 'F_gesamt', 'F_bereich', 'divisor', 'blockgroesse',  ↵
'abtastrate', 'stammname', 'kanal', 'kalibrierfaktor', 'fenster_typ',    ↵
'mittelungsanzahl', 'delta_f', 'frequenzen', 'delta_t', 'n_delta_t',     ↵
'dauer', 'gp_z', 'ueberlappung','aps_lin_mittel_Pa_gesamt',              ↵
'aps_lin_mittel_dB_gesamt', 'gp_aps_lin_mittel_dB_gesamt', 'tabelle',    ↵
'tabelle_inhalt', 'gp_terz_dB', 'log_f_stairs', 'log_f_mn', 'oktav_m',   ↵
'dateien', 'anzahl_mess');

ant_satz = menu('Neuen Dateisatz einlesen ?', 'JA', 'NEIN');
clear F_gesamt aps_lin_mittel_dB_gesamt gp_z gp_zeit aps_matrix zeit     ↵
aps_mittel gp_zeit_mittel tabelle tab_dB tab_dB_mittel;

end
```

20.15.4 Mat_lesen_darstellen

```
%-----------------------------------------------------------------------
%- Mat_lesen_darstellen
%- Programm zum Einlesen der MAT-Ergebnisdateien
%- 17.03.2003 Terence Klitz
%-----------------------------------------------------------------------
%-
%- Dieses Programm dient der Darstellung der Spektren, die mit dem
%- Programm Wav_Analyse_Programm_auto.m erstellt wurden. Dazu
%- werden die MAT-Dateien eingelesen.
%- Dargestellt werden das unbewertete APS, das unbewertete Terzspektrum
%- und der zeitliche Verlauf des Gesamtschalldruckpegels.
%-
%- Es können bis zu 6 Dateinen in einem Fenster geplottet werden
%- Es können Einzeldiagramme oder Multidiagramme geplottet werden.
%- Bei den Einzeldiagrammen wird jedes Spektrum einer MAT-Datei, das
%- dargestellt werden soll in einem eigenen Fenster geplottet.
%- Bei den Multidiagrammen werden die jeweiligen Spektren mehrerer
%- MAT-Dateien jeweils einem Fenster geplottet, z.B. alle APS oder
%- alle Terzspektren.
%- Bei den Multidiagrammen kann bei Bedarf ein Vergleichsterzspektrum
%- in das erstelle Terzspektrum hinzugefügt werden.
%- Das Vergleichsspektrum muss als Textdatei vorliegen, in der nur zwei
%- Spalten zulässig sind. Beide Spalten sind durch einen Tabulator
%- zu trennen. In der ersten Spalte stehen die Nennterzmittenfrequenzen,
%- in der zweiten Spalte jeweiligen Pegel.
%-
%- Zusätzlich können auch HP-MAT-Dateien eingelesen werden.
%-
%- Das Programm ist entsprechend dem Inhalt der MAT-Dateien erweiterbar.
%-----------------------------------------------------------------------

clear all;
close all;
clc;

ant = 'j'

%- Auswahlmenü
m_1 = menu('Diagrammwahl', 'Einzeldiagramme', 'Multidiagramme','Abbruch')
m_2 = 1;

if m_1 == 1; %- Darstellung von Einzeldiagrammen
        i = 0;
        while m_2 == 1
            clear F_gesamt aps_lin_mittel_dB_gesamt;
            i = i + 1;
            %- MAT-Datei wählen
            [dateiname, pfad] = uigetfile('*.mat', 'MAT-Ergebnisdatei     ↵
                                          wählen');
            load(strcat(pfad,dateiname));

            %- Den Pfad merken
            cd(pfad);

            figure(i)
            f_min = F_gesamt(1);
            f_max = F_gesamt(length(F_gesamt));
            freq_string_2 = ['Frequenzspanne [', num2str(f_min), '; ',     ↵
                             num2str(f_max), '] Hz'];
```

```
anz_gp = length(gp_z);
t_min = gp_z(1,1);
t_max = gp_z(anz_gp,1);
t_string = ['Zeitdauer [', num2str(t_min), '; ',
            num2str(t_max), '] s'];

%- APS plotten
if i == 1
    i_a = 1
else i_a = (3 * i) - 2;
end
figure(i_a);
set(gcf,'name', dateiname);
plot(F_gesamt, aps_lin_mittel_dB_gesamt, 'color', 'black');
title(['Datei:\ ', dateiname, '  Unbewertetes APS | Kanal: ',
kanal, ' | AVG = ', num2str(mittelungsanzahl,3), ' | GP:
',num2str(gp_aps_lin_mittel_dB_gesamt,'%5.1f'),' dB<rms> | ',
freq_string_2, '  Fenster: ', fenster_typ, ' | Überlappung: ',
num2str(ueberlappung), ' % | k: ',num2str(kalibrierfaktor), '
Pa/EU | delta_f: ', num2str(delta_f), ' Hz |  nfft: ',
num2str(blockgroesse), ' | f_ab :', num2str(abtastrate), '
Hz']);
xlabel('f [Hz]');
ylabel('Lp [dB<rms>]');
grid on;
set(gca, 'xlim', [f_min, f_max]);
set(gca,'fontsize', 10);
set(gca,'ygrid', 'on');
set(gca,'xgrid', 'on');
legend(strcat('\',dateiname));

%- LpG(t) plotten
if i == 1
    i_g = 2
else i_g = (3 * i) - 1;
end
figure(i_g);
set(gcf,'name', dateiname);
plot(gp_z(:,1), gp_z(:,2), 'color', 'black');
title(['Datei:\ ', dateiname, '  GP über der Zeit | Kanal: ',
kanal, ' | Anz. der GP: ', num2str(anz_gp), ' | GP:
',num2str(gp_aps_lin_mittel_dB_gesamt,'%5.1f'),' dB<rms> | ',
t_string, '  Fenster: ', fenster_typ, ' | Überlappung: ',
num2str(ueberlappung), ' % | k: ',num2str(kalibrierfaktor), '
Pa/EU | delta_t: ', num2str(delta_t), 'Hz |  nfft: ',
num2str(blockgroesse), ' | f_ab :', num2str(abtastrate), '
Hz']);
xlabel('t [s]');
ylabel('GP [dB<rms>]');
grid on;
set(gca, 'xlim', [0, t_max]);
set(gca, 'ylim', [0, (max(gp_z(:,2))+5)]);
set(gca,'fontsize', 10);
set(gca,'ygrid', 'on');
set(gca,'xgrid', 'on');
legend(strcat('\',dateiname));

%- Terzspetrum plotten
if i == 1
    i_t = 3
```

```
            else i_t = 3 * i;
            end
            amp_terz_spek = tabelle(:,10);
            amp_terz_spek((length(amp_terz_spek)+1)) =                    ↵
                                              tabelle(length(tabelle),10);
            terz_string = ['Terzmittelfrequenzen [',num2str(tabelle(1,1)),↵
                           '; ', num2str(tabelle(length(tabelle),1)), ']'];
            gp_terz_dB = 10*log10( sum( 10.^(tabelle(:,10)./10)));
            figure(i_t);
            set(gcf,'name', dateiname);

            stairs(log_f_stairs, amp_terz_spek, 'k');
            title(['Unbewertetes Terzspektrum; Kanal: ', kanal, ';AVG = ',↵
            num2str(mittelungsanzahl,3), '; GP: ',                        ↵
            num2str(gp_terz_dB,'%5.1f'), ' dB<rms>; ', terz_string]);
            xlabel('f [Hz]');
            ylabel('Lp [dB]');
            set(gca, 'xlim', [log_f_stairs(1),                            ↵
            log10(tabelle(length(tabelle),6))]);
            set(gca, 'xscale', 'linear');
            set(gca, 'xtick', log_f_mn);
            set(gca, 'xticklabel', oktav_m);
            set(gca, 'fontsize', 10);
            set(gca, 'xgrid', 'on');
            set(gca, 'ygrid', 'on');

            m_2 = menu('Weitere MAT-Datei ?', 'JA', 'NEIN');
        end %- while-Schleife

    end
if m_1 == 2 %- Darstellung Multidiagrammen
            i = 0;
            k = 0;
            while m_2 == 1

              clear F_gesamt aps_lin_mittel_dB_gesamt c1x c1;
              i = i + 1;
              k = k + 1;
              [dateiname, pfad] = uigetfile('*.mat', 'MAT-Ergebnisdatei   ↵
                                            wählen');
              load(strcat(pfad,dateiname));

              gp_fig = 1;
              terz_fig = 1;

              %- Wenn eine konvertierte HP-Datei geladen wird
              if exist ('c1x');
                  aps_lin_mittel_dB_gesamt = 20*log10(sqrt(c1./2));
                  F_gesamt = c1x;
                  gp_aps_lin_mittel_dB_gesamt = 0;
                  mittelungsanzahl = 0;
                  kanal = '--';
                  fenster_typ = 'hanning';
                  ueberlappung = '--';
                  kalibrierfaktor = 0;
                  delta_f = 0;
                  abtastrate = 0;
                  gp_z = 0;
                  gp_fig = 0;
                  terz_fig = 0;
              end
```

```
%- Pfad merken
cd(pfad);
legend_string = strcat('\', dateiname, ' (GP:',
num2str(gp_aps_lin_mittel_dB_gesamt,'%5.1f'), ' dB) ',
'AVG: ', num2str(mittelungsanzahl));
string_matrix(i).name = legend_string;
if i == 1
%- aps_matrix(:,1) = F_gesamt;
end
%- aps_matrix(:,(i+1)) = aps_lin_mittel_dB_gesamt;
f_min = F_gesamt(1);
f_max = F_gesamt(length(F_gesamt));
freq_string_2 = ['Frequenzspanne [', num2str(f_min),'; ',
                  num2str(f_max), '] Hz'];

anz_gp = length(gp_z);
t_min = gp_z(1,1);
t_max = gp_z(anz_gp,1);
               if k == 7;
    k = 1;
end

%- Farben für die Darstellung
farben = ['b' 'r' 'k' 'g' 'm' 'c' ];

%- APS plotten
figure(1);
plot(F_gesamt, aps_lin_mittel_dB_gesamt, 'color',farben(k));
%- farben = input('Farbe ("k" "r" "b" "g" "m" "c"): ', 's');
%- plot(F_gesamt, aps_lin_mittel_dB_gesamt, 'color', farben );
title(['\ Unbewertete APS | Kanal: ', kanal, ' | ',
freq_string_2, ' Fenster: ', fenster_typ, ' | Überlappung:
', num2str(ueberlappung), ' % | k:
',num2str(kalibrierfaktor), ' Pa/EU | delta_f: ',
num2str(delta_f), ' Hz | f_ab :', num2str(abtastrate), '
Hz']);
xlabel('f [Hz]');
ylabel('Lp [dB]');
grid on;
set(gca, 'xlim', [f_min, f_max]);
legend(string_matrix(:).name);
hold on

if gp_fig ~ 0  %- ~ ist gleich NOT, logisches NICHT
%- GP(t) plotten
figure(2);
plot(gp_z(:,1), gp_z(:,2), 'color', farben(k) );
title(['\ GP in Abhängigkeit der Zeit | Kanal: ',kanal, '
| Fenster: ', fenster_typ, ' | Überlappung: ',
num2str(ueberlappung),' % | k: ',num2str(kalibrierfaktor),
' Pa/EU | delta_t: ', num2str(delta_t), ' s | nfft: ',
num2str(blockgroesse), ' | f_ab :', num2str(abtastrate),'
Hz']);
xlabel('t [s]');
ylabel('GP [dB]');
grid on;
set(gca, 'xlim', [0, t_max]);
set(gca, 'ylim', [0, (max(gp_z(:,2))+5)]);
legend(string_matrix(:).name);
hold on
```

```
            end

            if terz_fig ~ 0
            %- Terzspektrum plotten
            amp_terz_spek = tabelle(:,10);
            amp_terz_spek((length(amp_terz_spek)+1)) =                  ↵
                                        tabelle(length(tabelle),10);
            terz_string = ['Terzmittelfrequenzen [',                    ↵
                           num2str(tabelle(1,1)), '; ',                 ↵
                           num2str(tabelle(length(tabelle),1)), ']'];   ↵
            gp_terz_dB = 10*log10( sum( 10.^(tabelle(:,10)./10)));

            figure(3);
            set(gcf,'name', dateiname);
                     stairs(log_f_stairs, amp_terz_spek, farben(k));
            title(['Unbewertetes Terzspektrum; Kanal: ', kanal, ';AVG    ↵
            = ', num2str(mittelungsanzahl,3), '; GP: ',                 ↵
            num2str(gp_terz_dB,'%5.1f'), ' dB<rms>; ', terz_string]);   ↵
            xlabel('f [Hz]');
            ylabel('Lp [dB]');
            set(gca, 'xlim', [log_f_stairs(1),                          ↵
            log10(tabelle(length(tabelle),6))]);
            set(gca, 'xscale', 'linear');
            set(gca, 'xtick', log_f_mn);
            set(gca, 'xticklabel', oktav_m);
            set(gca, 'fontsize', 10);
            set(gca, 'xgrid', 'on');
            set(gca, 'ygrid', 'on');
            hold on
            end
             m_2 = menu('Weitere MAT-Datei ?', 'JA', 'NEIN',            ↵
                       'Vergleichsplot');
          end
          hold off;
          figure(1);
       end
end

if m_2 == 3
    %- Einlesen eines Terzspektrums zum Vergleich
    %- Das Terzspektrum muss in einer 2-spaltigen Textdatei vorliegen
    %- Dezimaltrennzeichen : "." !!!!
    %- Spalte 1 muss die Terzmittenfrquenzen enthalten (nach Norm)
    %- Spalte 2 muss die zugehörigen Terzpegel enthalten
    %- Der Terzbereich der Textdatei muss mit dem aus der "tabelle"
    %- übereinstimmen.
    %- Es findet diesbezüglich keine Überprüfung statt.

    [text_dateiname, text_pfad] = uigetfile('*.TXT', ' Textdatei');
    textdatei_string = strcat(text_pfad, text_dateiname);
    [fm_terz, lp_terz] = textread(textdatei_string,'%u\t%f');
    i_f1_a = find(tabelle(:,1) == fm_terz(1));
    i_f1_e = find(tabelle(:,1) == fm_terz(length(fm_terz)));
    f_1_v = tabelle(i_f1_a:i_f1_e,3);
    f_1_v(length(f_1_v)+1) = tabelle(i_f1_e,6);
    lp_terz(length(lp_terz)+1) = lp_terz(length(lp_terz));
    log_f1_v = log10(f_1_v);
    hold on;
    figure(3);
    stairs(log_f1_v, lp_terz, 'r');
end
```

20.16 ANSYS-Quelltext

20.16.1 Statische Berechnung des Drehkanalgestells

```
!-------------------------------------------------------------------------
!- Statische Berechnung des Drehkanalgestells
!- Terence Klitz
!- Diplomarbeit 2002/2003
!- Stand 12.05.2003
!-------------------------------------------------------------------------
!- Diese Datei ist im FEM-Programm ANSYS einzulesen, es generiert das
!- Drehkanalgestell aus Balkenelementen und leitet die Berechnung ein.
!- Die Belastung wird durch drei Kräfte vorgegeben: F_1, F_2 und F_3.
!- Die Kräfte F_1 und F_2 werden in Streckenlasten umformuliert.
!- Das Gestell ist auf vier Festlagern gelagert.
!- Am Ende wird die Elemententafel mit den Schnittgrößen vorbereitet.
!- In den Ausführungen fehlt l_9, diese Länge wurde nachträglich heraus-
!- genommen.
!-
!- In dieser Variante ist auch die Entlastungsstütze des Gestells
!- enthalten. Für Berechnugen am Gestell ohne diese Entlastungsstütze,
!- ist die Linie 38 zu entfernen. Die sich dadurch ergebene Änderung der
!- Liniennummerierung ist im weiteren Programmablauf zu berücksichtigen.
!-
!- KP = Keypoint
!- L = Line
!-------------------------------------------------------------------------

FINI
/CLEAR

!-------------------------------------------------------------------------
!- Konstanten
!-------------------------------------------------------------------------

!- Vereinfachung der Profillängen:
!- Es werden Längen von 940 mm angenommen.
l_p    =  940                !- Profillänge

!- Gestellbeine
!- Bei den Gestellbeinen werden die Füße in der Länge nicht
!- mitberücksichtigt;
!- KP-Angaben für eine Stütze als Beispiel.
lst_1  =  705     !- Stützenabschnitt 1 (zwischen KP1 und KP17)
lst_2  =  765     !- Stützenabschnitt 2 (zwischen KP21 und KP1)
lst_3  =  280     !- Stützenabschnitt 3 (zwischen KP32 und KP21)
lst_4  =   50     !- Stützenabschnitt 4 (zwischen KP36 und KP32)

!- Hauptebene, auf der der Drehkanal ruht;
!- Längsträger (eine Formulierung für beide Längsträger);
!- KP-Angaben für einen Längsträger als Beispiel.
l_1    =  100                !- Abstand zwischen KP1 und KP2
l_2    =  714                !- Abstand zwischen KP2 und KP4
l_3    =  l_p - l_1 - l_2    !- Abstand zwischen KP4 und KP5
l_4    =  154                !- Abstand zwischen KP2 und KP3

!- Querträger (eine Formulierung für beide Querträger);
!- KP-Angaben für den Querträger der Antriebsseite.
l_5    =  220                !- Abstand zwischen KP2 und KP11
l_6    =  500                !- Abstand zwischen KP11 und KP13
l_7    =  l_5                !- Abstand zwischen KP13 und KP7
```

```
l_8    =  l_5 + (l_6 / 2)     !- Abstand zwischen KP2 und KP12

!- Antriebsebene, auf der der Motor befestigt ist;
!- Längsträger (eine Formulierung für beide Längsträger);
!- KP-Angaben für einen Längsträger als Beispiel.
l_10   = 214                  !- Abstand zwischen KP25 und KP26
l_11   = 139                  !- Abstand zwischen KP26 und KP27
l_12   = l_p - l_10 - l_11    !- Abstand zwischen KP27 und KP28

!- Entlastungsstütze.
l_13   = 113                  !- Abstand zwischen KP29 und KP30
l_14   = 765                  !- Länge der Entlastungtütze (KP29 bis KP12)

!- Elementenanzahl el auf den jeweiligen Längen.
!- Der Index gibt die Länge an, für die die Anzahl gilt.
el_l_p   =   60
el_lst_1 =   40
el_lst_2 =   40
el_lst_3 =   30
el_lst_4 =   20
el_l_1   =   20
el_l_2   =   70
el_l_3   =   30
el_l_4   =   20
el_l_4a  =   40         !- Anzahl der El. zwischen KP3 und KP4
el_l_5   =   70
el_l_6   =   80         !- Muss eine gerade Zahl sein
el_l_7   =   el_l_5
el_l_10  =   40
el_l_11  =   30
el_l_12  =   70
el_l_13  =   20
el_l_14  =   50

!---------------------------------------------------------------------------
!- Belastung des Gestells
!- Die Kräfte F_1 und F_2 gehen aus einer Auflagerberechnung des Drehkanals
!- hervor, in der die Kraft F_3 berücksichtug wird.
!---------------------------------------------------------------------------

F_3    =   450          !- Wellenbelastung durch die Riemenkraft
                        !- Max. Belastung: 3000 N
                        !- Annahme:         450 N
                        !- Nur DK-Gewicht:    0 N

!- Die Kräfte F_1 und F_2 ergeben sich aus der jeweiligen Belastung mit F_3
!- und müssen jeweils neu berechnet werden (EXCEL-Berechnungsblatt).
F_1    =   877        !- Auflagerkraft auf der Antriebsseite
F_2    =   705        !- Auflagerkraft auf der Abtriebsseite

!---------------------------------------------------------------------------

/PREP7
!---------------------------------------------------------------------------
!- Elementenwahl
!---------------------------------------------------------------------------

!- Daten der 40x40-item Profile leicht (1)

ET, 1, BEAM4                        !- Elementtype BEAM4
R, 1, 646, 90000, 90000, 40, 40, ,  !- Real Constants für den Satz (1)
                                    !- Querschnittsfläche 646 mm^2
```

```
                                    !- Flächenträgheitsmoment z (I_zz)
                                    !- Flächenträgheitsmoment y (I_yy)
                                    !- Länge z (Breite)
                                    !- Länge y (Höhe)
RMORE, , 11200, , , , ,             !- Torsionssteifigkeit
MP, EX, 1, 70000                    !- Material Props für den Satz (1)
                                    !- E-Modul
MP, GXY, 1, 20000                   !- G-Modul (Schubmodul)

!- Daten der 80x40-item Profile leicht (2)

ET, 2, BEAM4                        !- Elementtyp BEAM4
R, 2, 1138, 695400, 166000, 40, 80, ,
RMORE, , 19300, , , , ,
MP, EX, 2, 70000
MP, PRXY, 2, 0.3

!---------------------------------------------------------------------------
!- Keypoints
!- Koordinatenvergabe der Keypoints.
!---------------------------------------------------------------------------

!- Hauptebene, hier ist auch der Koordinatenursprung (KP1).

!- Längsträger A
K, 1, 0, 0, 0                       !- KP 1 bei X = 0, Y = 0, Z = 0
K, 2, l_1, 0, 0
K, 3, l_1+l_4, 0, 0
K, 4, l_1+l_2, 0, 0
K, 5, l_p, 0, 0

!- Längsträger B
K, 6, 0, 0, l_p
K, 7, l_1, 0, l_p
K, 8, l_1+l_4, 0, l_p
K, 9, l_1+l_2, 0, l_p
K, 10, l_p, 0, l_p

!- Querträger A
K, 11, l_1, 0, l_5
K, 12, l_1, 0, l_8
K, 13, l_1, 0, l_5+l_6

!- Querträger B
K, 14, l_1+l_2, 0, l_5
K, 15, l_1+l_2, 0, l_8
K, 16, l_1+l_2, 0, l_5+l_6

!- Oberer Stützrahmen
K, 17, 0, lst_1, 0
K, 18, l_p, lst_1,0
K, 19, 0, lst_1, l_p
K, 20, l_p, lst_1, l_p

!- Motorebene

!- Längsträger C
K, 21, 0, -lst_2, 0
K, 22, l_10, -lst_2, 0
K, 23, l_10+l_11, -lst_2, 0
K, 24, l_p, -lst_2, 0
```

```
!- Längsträger D
K, 25, 0, -lst_2, l_p
K, 26, l_10, -lst_2, l_p
K, 27, l_10+l_11, -lst_2, l_p
K, 28, l_p, -lst_2, l_p

!- Stützensteg
K, 29, l_10-l_13, -lst_2, l_8
K, 30, l_10, -lst_2, l_8
K, 31, l_10+l_11, -lst_2, l_8

!- Unterer Stützrahmen
K, 32, 0, -(lst_2+lst_3), 0
K, 33, l_p, -(lst_2+lst_3), 0
K, 34, 0, -(lst_2+lst_3), l_p
K, 35, l_p, -(lst_2+lst_3), l_p

!- Standebene
K, 36, 0, -(lst_2+lst_3+lst_4), 0
K, 37, l_p, -(lst_2+lst_3+lst_4), 0
K, 38, 0, -(lst_2+lst_3+lst_4), l_p
K, 39, l_p, -(lst_2+lst_3+lst_4), l_p

!------------------------------------------------------------------------
!- Linien
!- Die Linien werden zwischen zwei Keypoints erstellt, danach erfolgt die
!- Einteilung der Elemente. Eine "1" am Ende gibt an, dass die Einteilung
!- über der Linienlänge konstant sein soll.
!------------------------------------------------------------------------

!- Hauptrahmen

!- Querträger vorne / hinten
L,  1,  6, el_l_p, 1    !- 1        (1)
L,  5, 10, el_l_p, 1    !- 2        (1)

!- Längsträger (1)
L,  1,  2, el_l_1, 1    !- 3        (1)
L,  2,  3, el_l_4, 1    !- 4        (1)
L,  3,  4, el_l_4a, 1   !- 5        (1)
L,  4,  5, el_l_3, 1    !- 6        (1)

!- Längsträger (1)
L,  6,  7, el_l_1, 1    !- 7        (1)
L,  7,  8, el_l_4, 1    !- 8        (1)
L,  8,  9, el_l_4a, 1   !- 9        (1)
L,  9, 10, el_l_3, 1    !- 10       (1)

!- Querträger (1), (3)
L,  2, 11, el_l_5, 1    !- 11       (1)
L, 11, 12, el_l_6/2, 1  !- 12       (1)
L, 12, 13, el_l_6/2, 1  !- 13       (1)
L, 13,  7, el_l_7, 1    !- 14       (1)

!- Querversteifung (1)
L, 3, 8, el_l_p, 1      !- 15       (1)

!- Querträger (1), (3)
L,  4, 14, el_l_5, 1    !- 16       (1)
L, 14, 15, el_l_6/2, 1  !- 17       (1)
L, 15, 16, el_l_6/2, 1  !- 18       (1)
L, 16,  9, el_l_7, 1    !- 19       (1)
```

```
!- Oberer Stützrahmen (1)

L, 17, 19, el_l_p, 1    !- 20       (1)
L, 18, 20, el_l_p, 1    !- 21       (1)
L, 17, 18, el_l_p, 1    !- 22       (1)
L, 19, 20, el_l_p, 1    !- 23       (1)

!- Motorebene

!- Querträger vorne / hinten
L, 21, 25, el_l_p, 1    !- 24       (1)
L, 24, 28, el_l_p, 1    !- 25       (1)

!- Längsträger (2)
L, 21, 22, el_l_10, 1   !- 26       (2)
L, 22, 23, el_l_11, 1   !- 27       (2)
L, 23, 24, el_l_12, 1   !- 28       (2)

!- Längsträger (2)
L, 25, 26, el_l_10, 1   !- 29       (2)
L, 26, 27, el_l_11, 1   !- 30       (2)
L, 27, 28, el_l_12, 1   !- 31       (2)

!- Querträger (2), (1)
L, 22, 30, el_l_p/2, 1  !- 32       (2)
L, 30, 26, el_l_p/2, 1  !- 33       (2)
L, 23, 31, el_l_p/2, 1  !- 34       (1)
L, 31, 27, el_l_p/2, 1  !- 35       (1)

!- Motorhalterungsersatz
L, 29, 30, el_l_13, 1   !- 36       (2)
L, 30, 31, el_l_11, 1   !- 37       (2)

!- Entlastungsstütze
L, 29, 12, el_l_14, 1   !- 38       (1)

!- Unterer Stützenrahmen

L, 32, 34, el_l_p, 1    !- 39       (1)
L, 33, 35, el_l_p, 1    !- 40       (1)
L, 32, 33, el_l_p, 1    !- 41       (1)
L, 34, 35, el_l_p, 1    !- 42       (1)

!- Gestellbeine

L, 36, 32, el_lst_4, 1  !- 43       (1)
L, 32, 21, el_lst_3, 1  !- 44       (1)
L, 21,  1, el_lst_2, 1  !- 45       (1)
L,  1, 17, el_lst_1, 1  !- 46       (1)

L, 37, 33, el_lst_4, 1  !- 47       (1)
L, 33, 24, el_lst_3, 1  !- 48       (1)
L, 24,  5, el_lst_2, 1  !- 49       (1)
L,  5, 18, el_lst_1, 1  !- 50       (1)

L, 38, 34, el_lst_4, 1  !- 51       (1)
L, 34, 25, el_lst_3, 1  !- 52       (1)
L, 25,  6, el_lst_2, 1  !- 53       (1)
L,  6, 19, el_lst_1, 1  !- 54       (1)

L, 39, 35, el_lst_4, 1  !- 55       (1)
L, 35, 28, el_lst_3, 1  !- 56       (1)
```

```
L, 28, 10, el_lst_2, 1  !- 57       (1)
L, 10, 20, el_lst_1, 1  !- 58       (1)

!-------------------------------------------------------------------------
!- Vernetzen aller Linien
!- Zuweisung der Elementeneigenschaften auf die jeweiligen Linien.
!-------------------------------------------------------------------------

TYPE, 1                    !- Mit (1) gekennzeichnete Linien
MAT, 1
REAL, 1
LSEL, S, LINE, , 1, 25
LSEL, A, LINE, , 34, 35
LSEL, A, LINE, , 38, 58
LMESH, ALL

TYPE, 2                    !- Mit (2) gekennzeichnete Linien
MAT, 2
REAL, 2
LSEL, S, LINE, , 26, 33
LSEL, A, LINE, , 36, 37
LMESH, ALL

!-------------------------------------------------------------------------

/SOLU

!- Lagerdefinition

!- KP-Auswahl für die Lager

KSEL, S, KP, , 36
KSEL, A, KP, , 37
KSEL, A, KP, , 38
KSEL, A, KP, , 39

!- Anbringen der Lagerbedingungen:
!- Festlager

DK,ALL,,,,0,UX
DK,ALL,,,,0,UY
DK,ALL,,,,0,UZ

!- Knoten-Wahl, für die Belastungen

!- Am Motor
KSEL, S, KP, , 30
FK, ALL, FY, F_3
!- Querträger Antriebsseits (KP2 bis KP7)
NSEL, S, LOC, X, l_1
NSEL, U, LOC, Y, -l_14, -(l_14/el_l_14)
NSEL, U, LOC, Z, 0, l_5-(l_5/el_l_5)
NSEL, U, LOC, Z, (l_5+l_6)+(l_5/el_l_5), l_p
F, ALL, FY, -F_1/(el_l_6+1)

!- Querträger Abtriebsseite (KP4 bis KP9)
NSEL, S, LOC, X, l_1+l_2
NSEL, U, LOC, Z, 0, l_5-(l_5/el_l_5)
NSEL, U, LOC, Z, (l_5+l_6)+(l_5/el_l_5), l_p
F, ALL, FY, -F_2/(el_l_6+1)

!- Alles auswählen
```

```
ALLSEL

!------------------------------------------------------------------------
!- Berechnung
!------------------------------------------------------------------------

SOLVE

!------------------------------------------------------------------------

/POST1

!- Letzten Ergebnissatz wählen

SET,LAST

!- Einrichten der Elemententafeln

ETABLE, FXi, SMISC, 1   !- Tafel für die Kräfte in X-Richtung Knoten I
ETABLE, FXj, SMISC, 7   !- Tafel für die Kräfte in X-Richtung Knoten J
ETABLE, FYi, SMISC, 2
ETABLE, FYj, SMISC, 8
ETABLE, FZi, SMISC, 3
ETABLE, FZj, SMISC, 9
ETABLE, MXXi, SMISC, 4
ETABLE, MXXj, SMISC, 10
ETABLE, MYYi, SMISC, 5
ETABLE, MYYj, SMISC, 11
ETABLE, MZZi, SMISC, 6
ETABLE, MZZj, SMISC, 1
```

20.17 AutoCAD-Zeichnungen

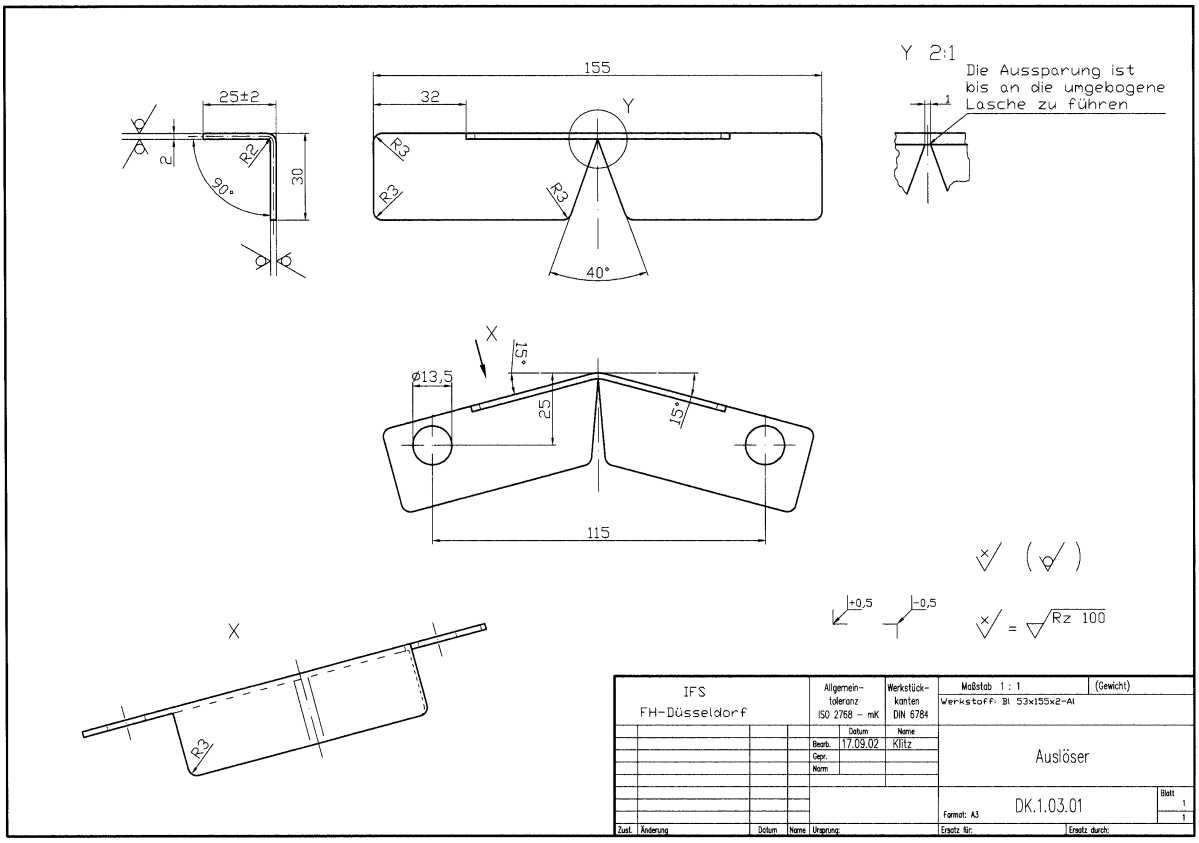


Abbildung 20.27: CAD-Zeichnung des Auslösers, der am Rohr des Drehkanals befestigt ist.

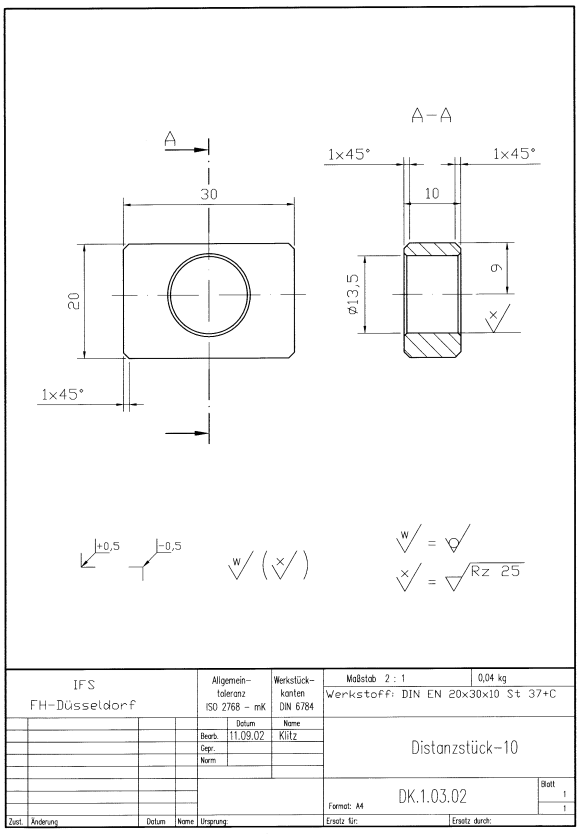


Abbildung 20.28: Distanzstücke, um den Auslöser von dem Rohrflansch zu distanzieren.

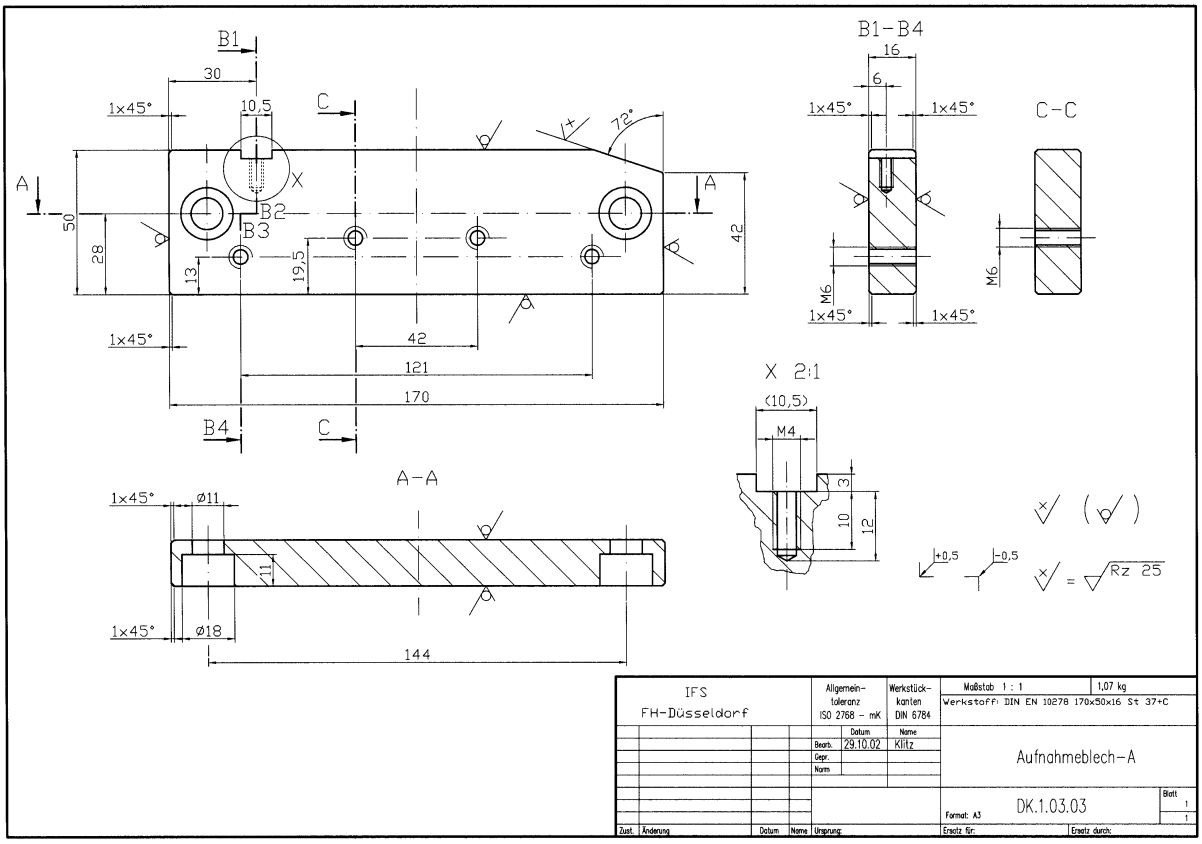


Abbildung 20.29: Aufnahmeblech für den Schalter und Taster der negativen Begrenzung.

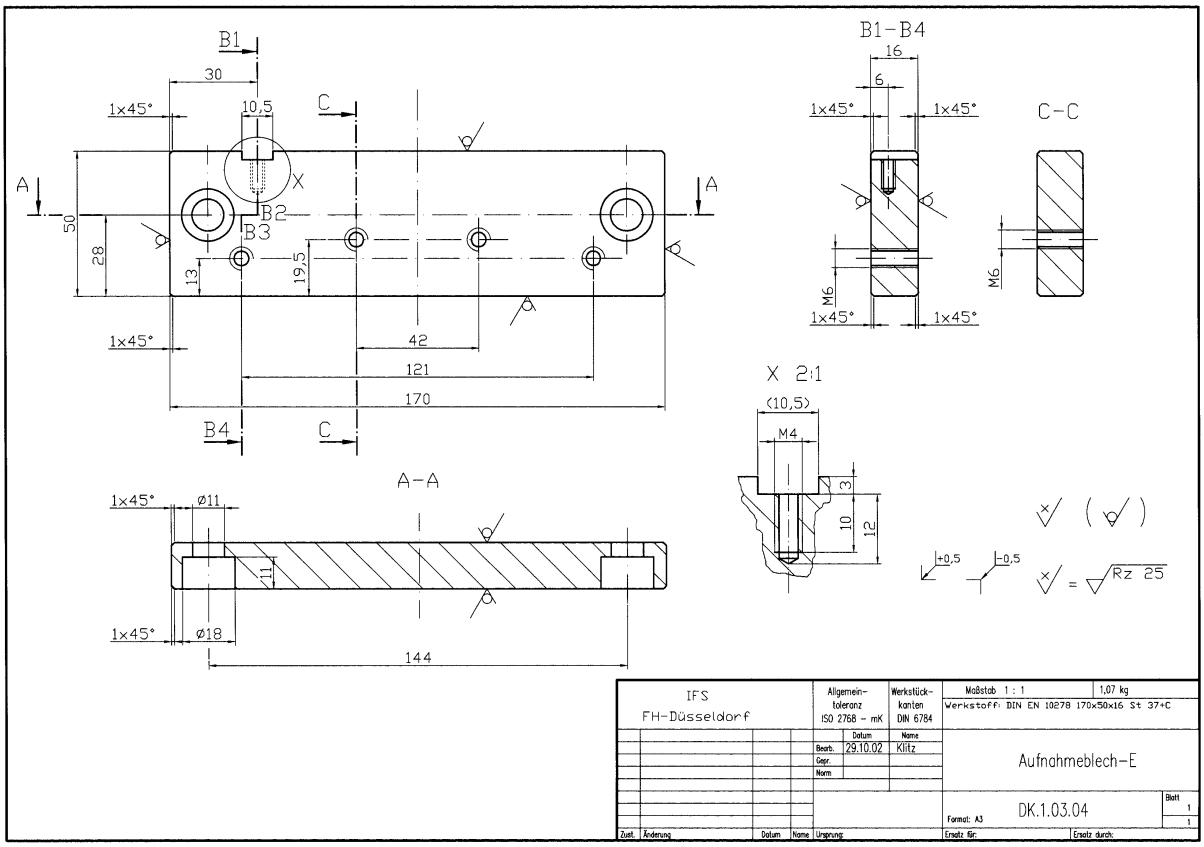


Abbildung 20.30: Abbildung 20.31: Aufnahmeblech für den Schalter und Taster der positiven Begrenzung.

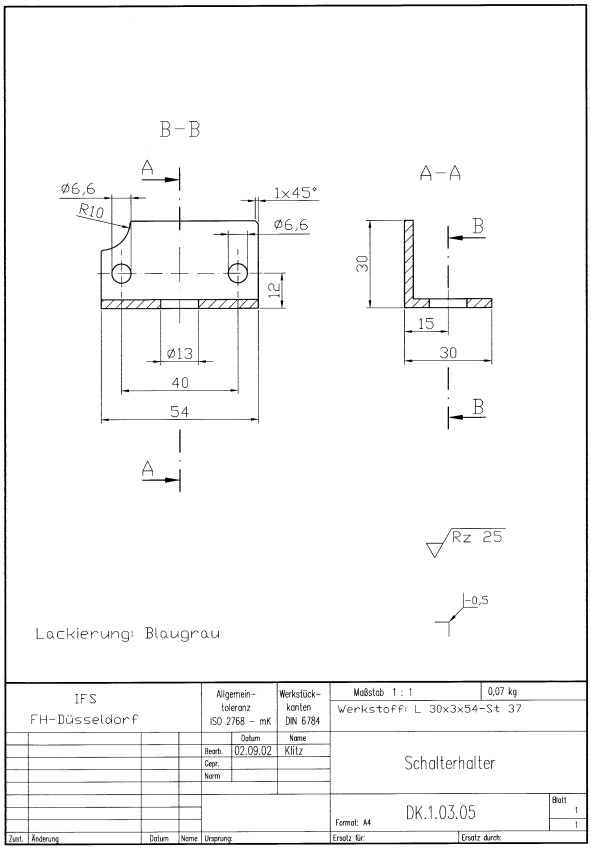


Abbildung 20.32: Halterung für den Schalter.

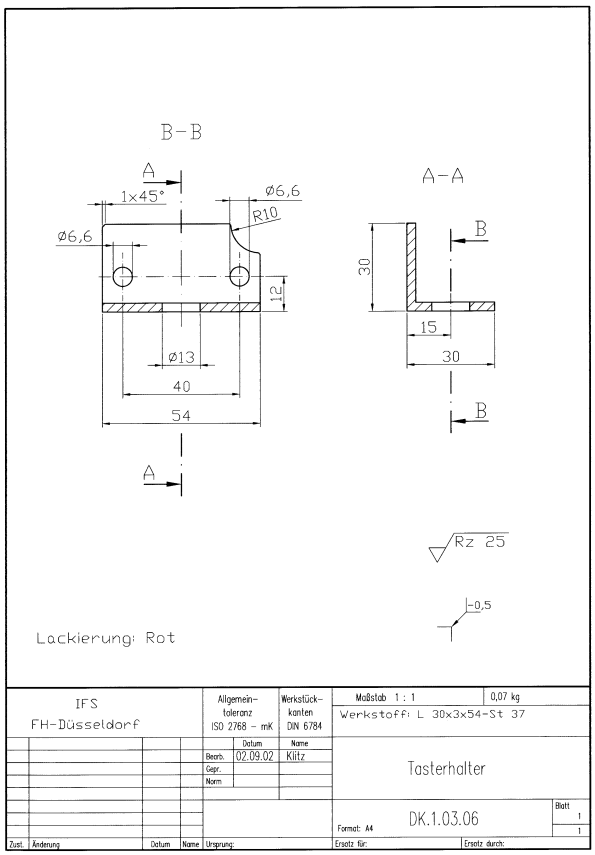
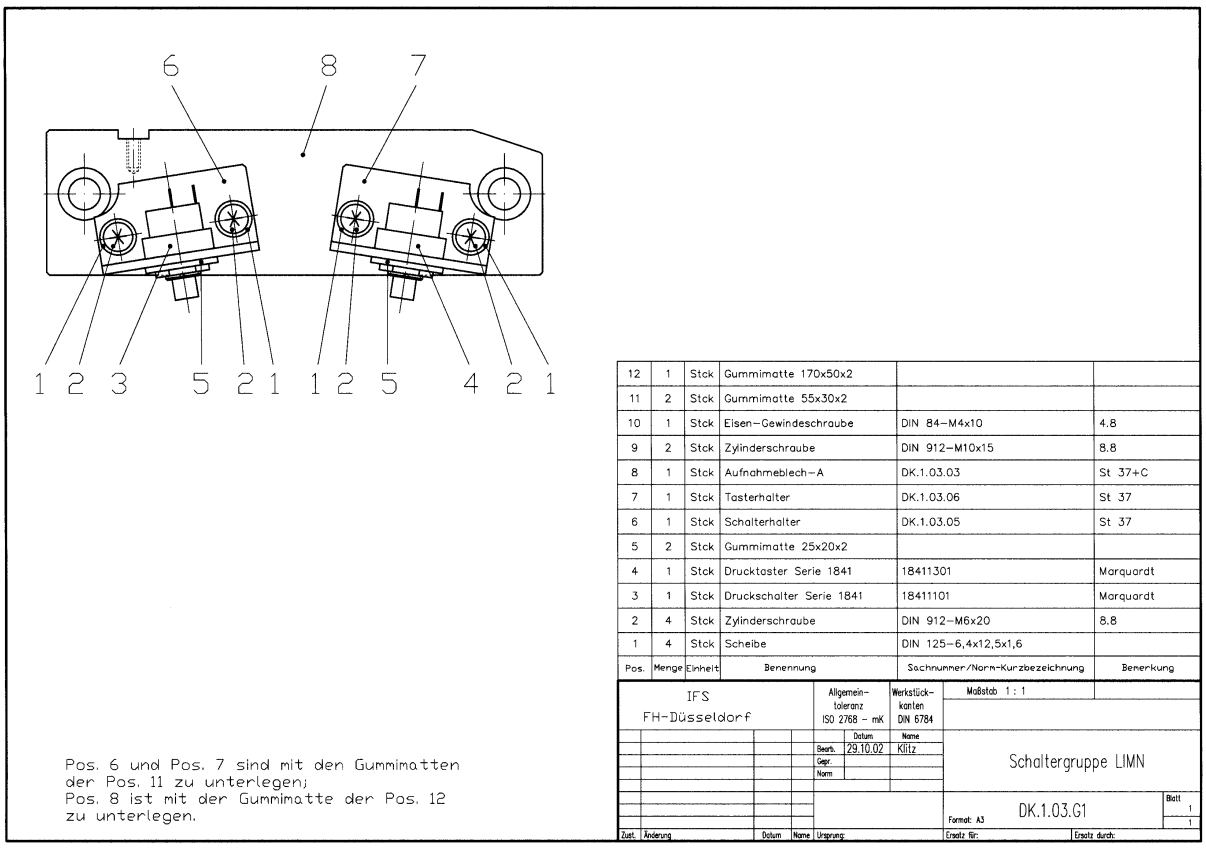


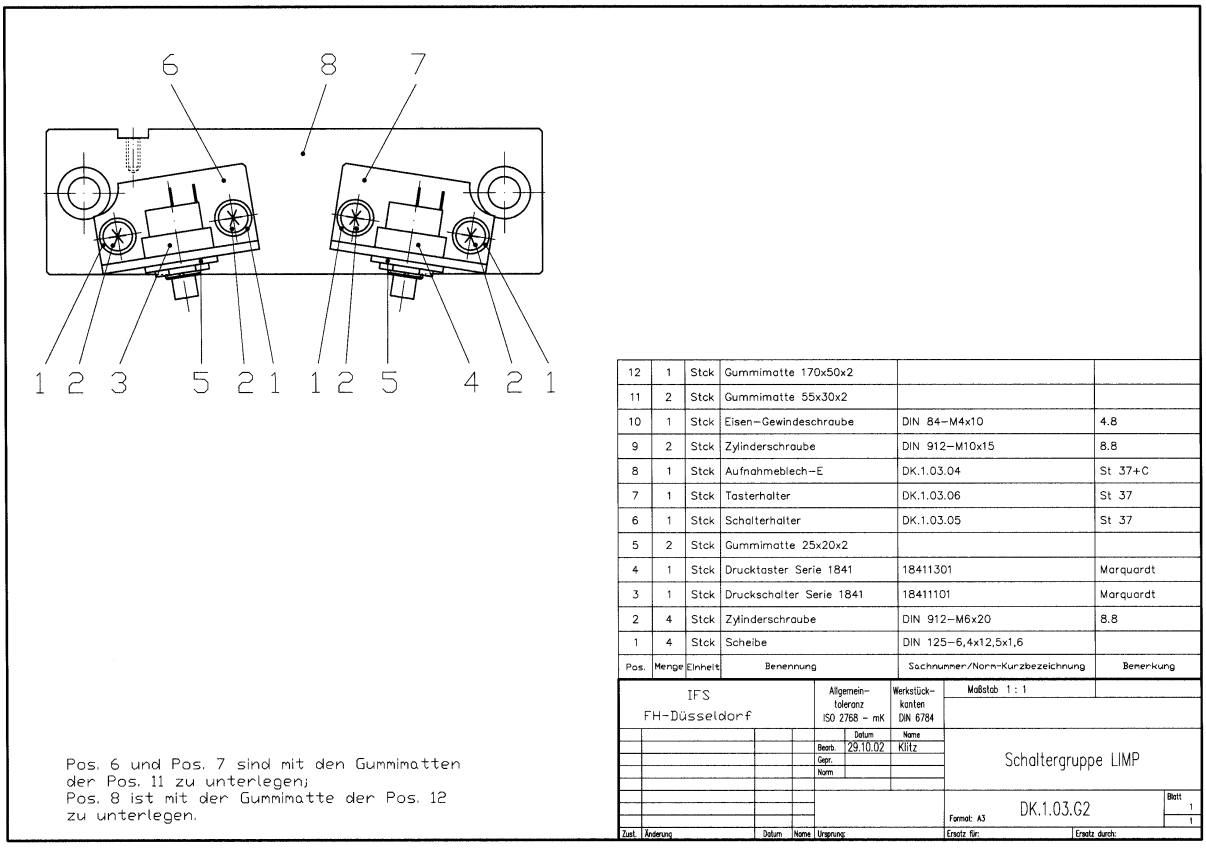
Abbildung 20.33: Halterung für den Taster.



Pos.	Menge	Einheit	Benennung	Sachnummer/Norm-Kurzbezeichnung	Bemerkung
12	1	Stck	Gummimatte 170x50x2		
11	2	Stck	Gummimatte 55x30x2		
10	1	Stck	Eisen-Gewindeschraube	DIN 84-M4x10	4.8
9	2	Stck	Zylinderschraube	DIN 912-M10x15	8.8
8	1	Stck	Aufnahmeblech-A	DK.1.03.03	St 37+C
7	1	Stck	Tasterhalter	DK.1.03.06	St 37
6	1	Stck	Schalterhalter	DK.1.03.05	St 37
5	2	Stck	Gummimatte 25x20x2		
4	1	Stck	Drucktaster Serie 1841	18411301	Marquardt
3	1	Stck	Druckschalter Serie 1841	18411101	Marquardt
2	4	Stck	Zylinderschraube	DIN 912-M6x20	8.8
1	4	Stck	Scheibe	DIN 125-6,4x12,5x1,6	

IFS FH-Düsseldorf | Allgemeintoleranz ISO 2768 - mK | Werkstückkanten DIN 6784 | Maßstab 1 : 1
Bearb. 29.10.02 Klitz | Gepr. | Norm
Schaltergruppe LIMN
DK.1.03.G1 | Format: A3 | Blatt 1 1
Zust. Änderung | Datum | Name | Ursprung: | Ersatz für: | Ersatz durch:

Abbildung 20.34: Zusammenbauzeichnung der Schaltergruppe der negativen Begrenzung.



Pos.	Menge	Einheit	Benennung	Sachnummer/Norm-Kurzbezeichnung	Bemerkung
12	1	Stck	Gummimatte 170x50x2		
11	2	Stck	Gummimatte 55x30x2		
10	1	Stck	Eisen-Gewindeschraube	DIN 84-M4x10	4.8
9	2	Stck	Zylinderschraube	DIN 912-M10x15	8.8
8	1	Stck	Aufnahmeblech-E	DK.1.03.04	St 37+C
7	1	Stck	Tasterhalter	DK.1.03.06	St 37
6	1	Stck	Schalterhalter	DK.1.03.05	St 37
5	2	Stck	Gummimatte 25x20x2		
4	1	Stck	Drucktaster Serie 1841	18411301	Marquardt
3	1	Stck	Druckschalter Serie 1841	18411101	Marquardt
2	4	Stck	Zylinderschraube	DIN 912-M6x20	8.8
1	4	Stck	Scheibe	DIN 125-6,4x12,5x1,6	

IFS FH-Düsseldorf | Allgemeintoleranz ISO 2768 - mK | Werkstückkanten DIN 6784 | Maßstab 1 : 1
Bearb. 29.10.02 Klitz | Gepr. | Norm
Schaltergruppe LIMP
DK.1.03.G2 | Format: A3 | Blatt 1 1
Zust. Änderung | Datum | Name | Ursprung: | Ersatz für: | Ersatz durch:

Abbildung 20.35: Zusammenbauzeichnung der Schaltergruppe der positiven Begrenzung.

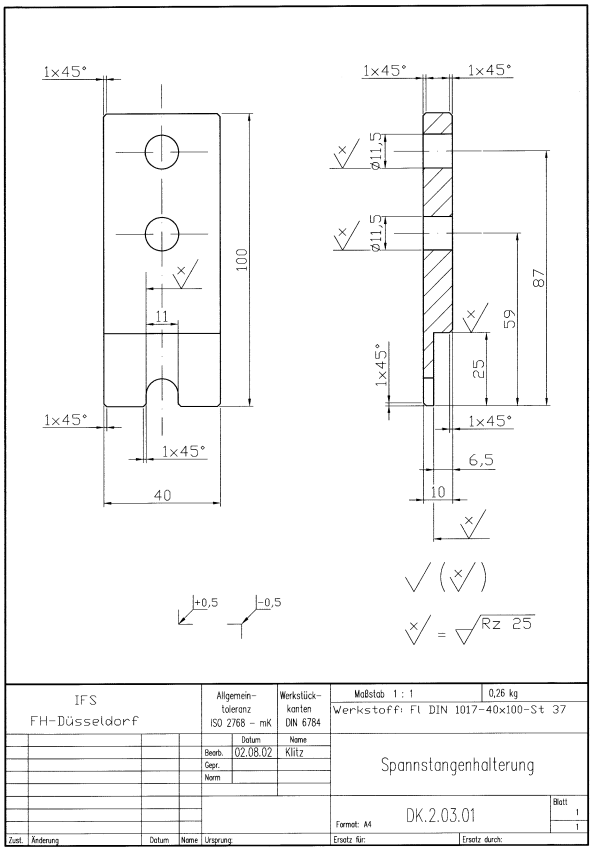


Abbildung 20.36: Halter für die Spannstange-L.

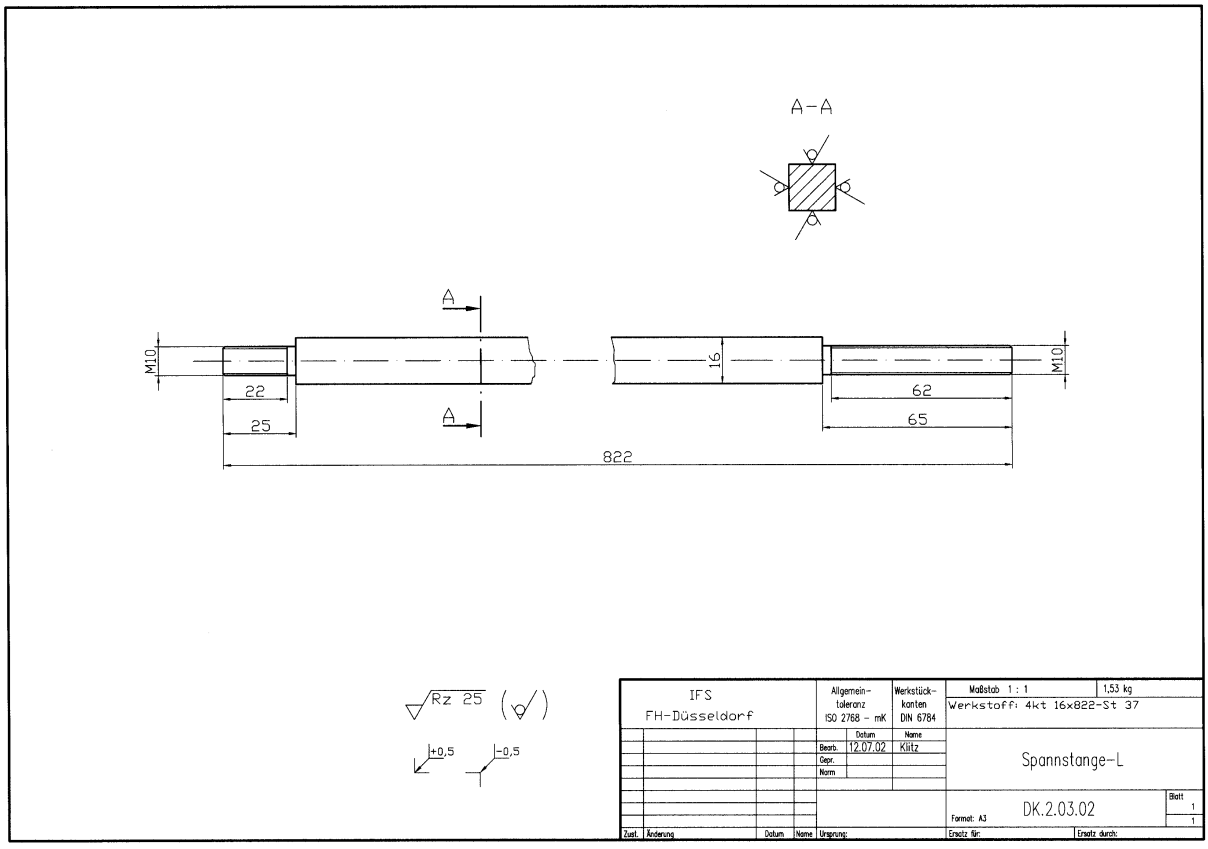


Abbildung 20.37: Zeichnung der Spannstange-L.

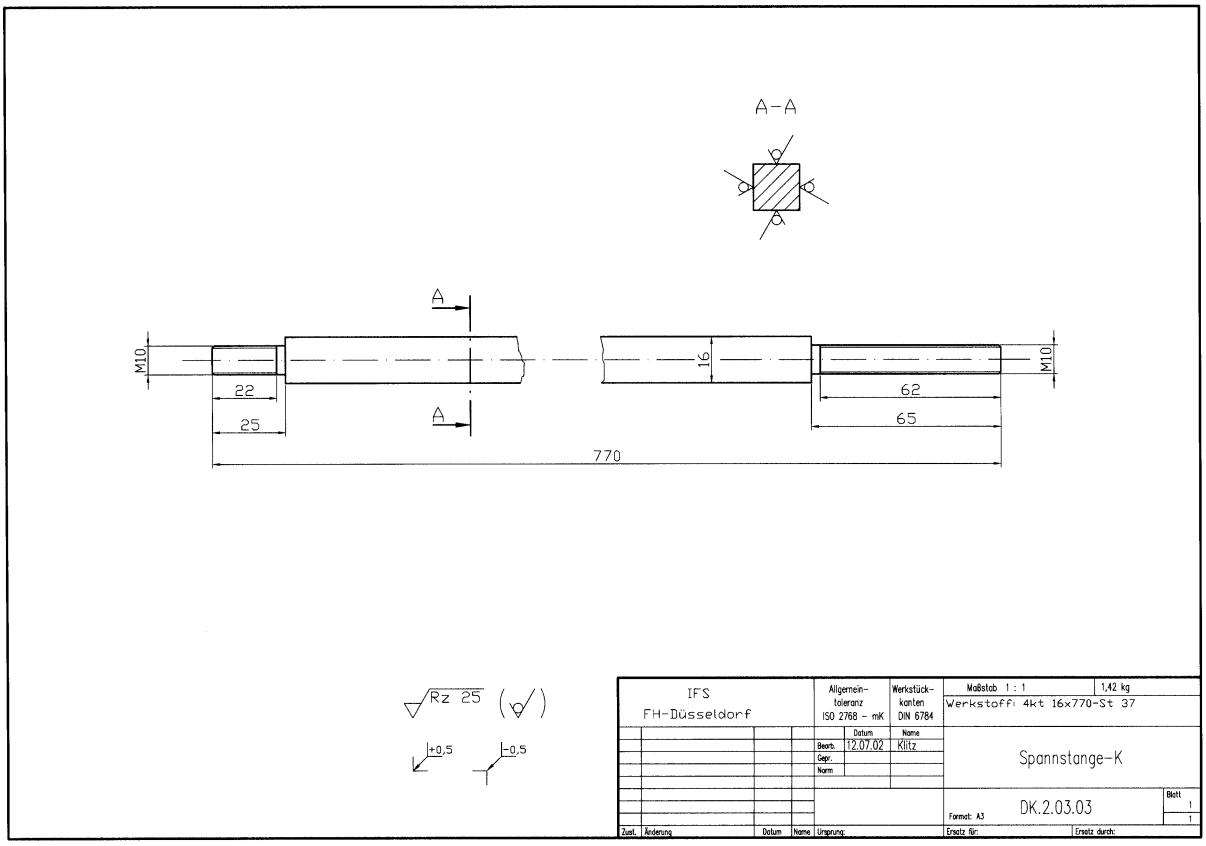


Abbildung 20.38: Zeichnung der Spannstange-K.